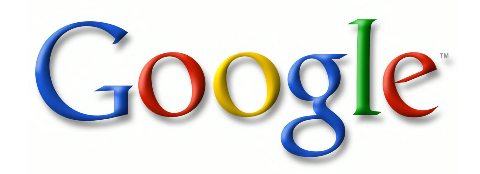


in stetem Sinken begriffen ist, nachdem man angefangen hat, die Salzflüssigkeit hineinzuleiten, erhält es sich bei anderen bis 6 Stunden lang (vom Verf. notirtes Maximum) unverändert trotz der mit der Arbeit fortschreitenden Ausspülung der Blutreste und des Gewebesaftes.

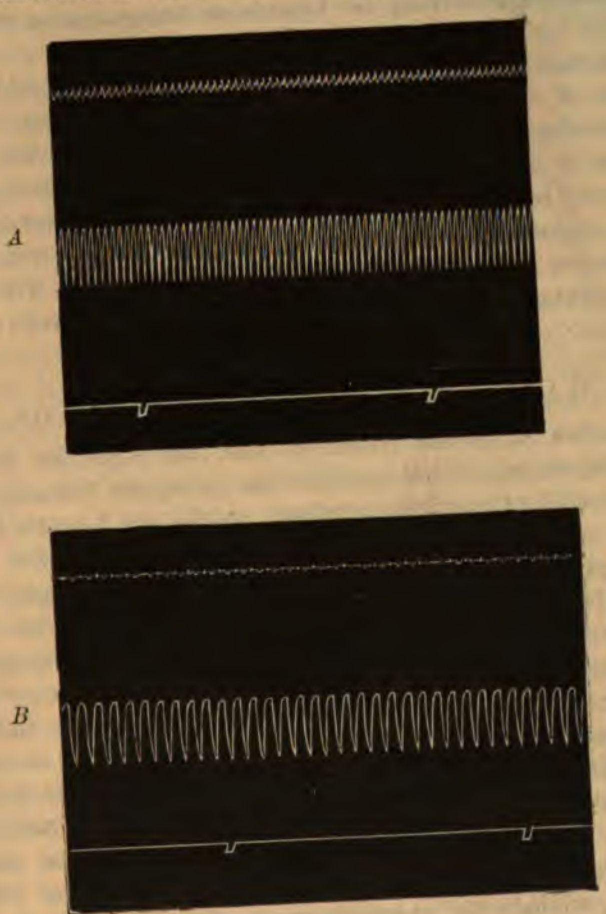
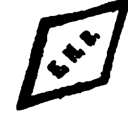
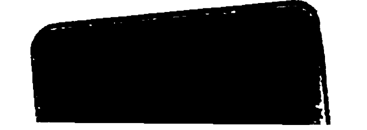


Fig. 2. Manometercurven von einem Herzen, welches bei *A* mit einer Lösung der Serumsalze (nach Ausschliessung von Mg und H_2SO_4), bei *B* mit Ringer's Flüssigkeit arbeitet. Der Vorhof schreibt oberhalb der Kammer. Zeitmarkirung in Minuten.

Der letzterwähnte Umstand, zusammengestellt mit der Erfahrung, dass die für die Ausspülung am leichtesten erreichbare Musculatur des Vorhofes in keiner Weise schneller geschwächt wird als die Kammermusculatur, scheint uns bestimmt dafür zu sprechen, dass es in den Muskelzellen selbst einen seiner Menge nach variabeln Vorrath von







SKANDINAVISCHES

ARCHIV FÜR PHYSIOLOGIE.

UNTER MITWIRKUNG VON

PROF. DR. S. TORUP IN CHRISTIANIA, PROF. DR. K. G. HÄLLSTÉN, PROF. DR. E. A. HOMÉN UND PROF. DR. E. E. SUNDVIK IN HELSINGFORS, PROF. DR. CHR. BOHR IN KOPENHAGEN, PROF. DR. M. BLIX IN LUND, PROF. DR. J. E. JOHANSSON, PROF. DR. S. JOLIN, PROF. DR. K. A. H. MÖRNER UND PROF. DR. C. G. SANTESSON IN STOCKHOLM, PROF. DR. O. HAMMARSTEN UND PROF. DR. HJ. ÖHRWALL IN UPSALA

HERAUSGEGEBEN

VON

DR. ROBERT TIGERSTEDT,

O. Ö. PROFESSOR DER PHYSIOLOGIE AN DER UNIVERSITÄT HELSINGFORS.

ZWÖLFTER BAND.

MIT ZAHLREICHEN ABBILDUNGEN IM TEXT UND ZEHN TAFELN.



LEIPZIG,

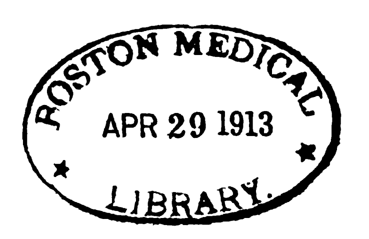
VERLAG VON VEIT & COMP.

1902.



Druck von Metzger & Wittig in Leipzig.

Inhalt.



Ueber die chemischen Bedingungen für die Activität des überlebenden Froschherzens.[1]

Von

G. F. Göthlin.

(Aus dem physiologischen Laboratorium in Upsala.)

Bei dem Studium der chemischen Voraussetzungen für die normale Function des Muskelgewebes hat man in dem überlebenden Herzen ein werthvolles Versuchsobject. Im Gegensatz zu den Skelettmuskeln kann der Herzmuskel zufolge des eigenthümlichen Baues des Organes mit Leichtigkeit dem gleichzeitigen Einfluss einer umgebenden Gasmischung und einer in dessen Cavitäten eingeschlossenen, durch die eigene Arbeit des Herzens erneuerten Flüssigkeit unterworfen werden. Die Wirkung verschiedener chemischer Faktoren, so weit sie sich in functionellen Veränderungen äussert, lässt sich erkennen bei Beobachtung der Volumsveränderungen bei den Räumen, welche das Herz mit seinen Wänden umschliesst.

I. Historischer Ueberblick.[2]

Die ersten experimentellen Studien über die Bedingungen für die Herzarbeit datiren aus den 1870er Jahren. Zu dieser Zeit war das überlebende Herz kaltblütiger Thiere (Frosch, Schildkröte) das einzige, welches man für eine methodische Untersuchung zu verwenden verstand, während es nunmehr auch gelingt, das Säugethierherz im überlebenden Zustande zu erhalten und die Bedingungen für dessen Thätigkeit zu prüfen. Die bis jetzt wichtigsten Resultate sind beim Studium der erstgenannten Art von Versuchsobjecten erhalten worden und dürften einen kurzen Ueberblick verdienen, umsomehr, als sie zu mehreren

[1] Der Redaction am 20. März 1901 zugegangen.

[2] Der Grund dafür, dass einige neuerdings über denselben Gegenstand erschienene Arbeiten nicht berücksichtigt worden sind, ist der, dass dieser Aufsatz schon im Jahre 1899 in schwedischer Sprache veröffentlicht wurde (*Upsala Läkareförenings Förhandlingar* [*1899*]. Ny följd. Bd. IV. S. 519 bis 571).

abweichenden und zum Theil einander widersprechenden Ansichten Veranlassung gegeben haben.

Grundlegend für die Kenntniss von dem specifischen Einfluss des Herzmuskels auf den Arbeitsverlauf war Bowditch's[1] Entdeckung, dass die Grösse der Zusammenziehung des Herzmuskels unter sonst gleichartigen Verhältnissen von der Stärke der Reizung unabhängig ist, wenn nur die Reizung überhaupt effectiv ist. Sie führt nämlich zu der äusserst wichtigen Consequenz, dass Variationen in der Schlaghöhe sich nur aus veränderlichen Eigenschaften des Muskels selbst erklären lassen. Als Kronecker und Stirling (2) später fanden, dass die Stärke der Pulsschläge bei dem abgeschnürten Ventrikel hastig abnahm, wenn anstatt der Blutflüssigkeit 0·6 Proc. NaCl-Lösung hineingeleitet wurde, war damit also bewiesen, dass die Kochsalzlösung nicht die für die Functionen der Musculatur nothwendigen chemischen Bedingungen bietet. Indess bewirkte der Austausch von Blut gegen Salzwasser auf einmal die Entfernung einer grossen Anzahl chemischer Faktoren, und es erübrigte also zu erforschen, welche von diesen Faktoren wesentlich sind und die Ueberlegenheit der Blutflüssigkeit bedingen.

Merunovics,[2] welcher sich mit dieser Aufgabe beschäftigte, constatirte, dass die Asche von Serum und in noch höherem Grade die Asche von dessen Alkoholextract nach Auflösung in Wasser die Herzschläge besser unterhält als die reine NaCl-Lösung, und dass dieser Umstand zum Theil auf einer günstigen Wirkung des Alkalicarbonats beruht. Stienon (3) machte kurz darauf die Beobachtung, dass der Unterschied in der Wirkung des frischen Serums und des Filtrates aus demselben Serum, erhitzt zum Sieden, hauptsächlich in einer der Zeit nach mehr begrenzten Fähigkeit des letzteren liegt, ein Herzpräparat zu rehabilitiren, dessen Kraft durch Behandlung mit reiner NaCl-Lösung auf ein Minimum gesunken ist. Er fand auch, dass eine Aufhebung der Alkalescenz des Serums durch Neutralisation mit Säure in wesentlichem Grade dessen Fähigkeit, die Herzarbeit aufrecht zu erhalten, verringerte. Endlich zeigte er, dass eine mit 0·1 Proc. Na_2CO_3 alkalisirte NaCl-Lösung wieder Contractionen einleitet, wenn das Herz aufgehört hat, bei Speisung mit einer neutralen NaCl-Lösung zu schlagen. Später fand Gaule (4), dass kleine Mengen NaOH (1:200 000 bis 20 000 Wasser) in dieser Beziehung zu günstigeren Resultaten führen als das Carbonat, und er stellte titrimetrisch fest, dass sowohl das Alkali durch die Herzarbeit neutralisirt

[1] Cit. nach (2). Die Ziffern innerhalb der Klammern weisen auf das Litteraturverzeichniss hin.

[2] Cit. nach (3) und (4).

wurde, wie auch, dass der grössere Theil dabei mit einer in Kochung flüchtigen Säure, also wahrscheinlich Kohlensäure, eine Bindung einging. Dadurch, dass er für erneuerte Alkalizufuhr sorgte, gewann er dem Herzen eine mechanische Arbeit ab, welche er nur durch die Annahme erklären zu können vermeinte, dass der Herzmuskel während der Arbeit von einem in seiner eigenen Substanz magazinirten Vorrath von chemischer Spannkraft zehrte.

Martius (6), welcher von Gaule's Erklärung nicht befriedigt war, betonte die Schwierigkeit, alle Blutreste vollständig zu entfernen, und nahm an, dass das Alkali in Gaule's Experimenten die nutritiven Residuen der Assimilation leichter zugänglich machte. Selbst machte er Experimente in der Absicht, im Serum eine organische Substanz der Natur aufzusuchen, für die Entwickelung der Muskelkraft Material liefern zu können. Nachdem er Lösungen von Glykogen, Pepton und anderen Substanzen in Kochsalzflüssigkeit vergebens, aber mit ebenso entschiedenem positivem Resultat Serum und Lymphe geprüft hatte, machte er die Ansicht geltend, dass nur serumalbuminhaltige Flüssigkeiten dauernd die Energie des Herzens aufrecht erhalten können, und dass die Kraftentwickelung der Muskelzelle an die gleichzeitige Anwesenheit von Nutritionsmaterial in dem Gewebesafte gebunden ist. Der letztgenannte Schluss, welcher direct gegen Gaule's Auffassung stritt, gründet sich indess auf Experimente, welche wesentlich an Beweiskraft verloren haben, nachdem Ringer (8) (und mehrere vorhergegangene Mittheilungen desselben Autors) gefunden hat, dass die Anwesenheit von Calcium- und Kaliumsalzen zu einer verlängerten und erhöhten Herzarbeit beiträgt. Gestützt auf die letztgenannte Erfahrung macht Ringer die befugte Bemerkung, dass ein Herz seine Contractilität bei Ausspülung auch mit alkalisirter NaCl-Lösung verliert, nicht weil das Material für die Muskelkraft vollständig entfernt wird, sondern weil die Calcium- und Kaliumsalze vorher durch Diffusion ausgelöst werden. Bei deren Abwesenheit hört die Herzarbeit auf, obgleich das Muskelgewebe ohne Zweifel Material für fortgesetzte Kraftentwickelung enthält, das sich in den Muskelzellen selbst befindet und darum für Wegspülung schwer erreichbar ist. Ringer theilt die Ansicht, dass das Serumalbumin die Contractilität des Herzens erhöht, scheint aber unentschieden zu lassen, ob es dabei die Rolle eines Nutritionsmateriales für den Muskel spielt.

Im Gegensatz zu der allgemeinen Ansicht glaubte Heffter (14) gefunden zu haben, dass specifische Eigenschaften der rothen Blutkörperchen diese für die Herzarbeit unentbehrlich machen, welche nach seinem Dafürhalten von einer Flüssigkeit bedient wird, die rothe

Blutkörperchen enthält, mit dem Gewebe isotonisch und dem Blute isoviskos ist. Albanese (16) weicht insofern ab, als er ausser den genannten physikalischen Eigenschaften nur einen gewissen Sauerstoffgehalt der Flüssigkeit erforderlich findet, gleichviel ob der Sauerstoff in der Flüssigkeit gelöst oder an die Formelemente gebunden ist. Keiner von diesen Autoren setzt die Anwesenheit von Calcium- und Kaliumsalzen als nothwendig voraus.

Locke (17) theilt Experimente mit, welche nach seiner Vermuthung zeigen, dass ein Zusatz von Traubenzucker zu einer unorganischen Flüssigkeit diese in höherem Grade geeignet macht, die Kraft des Herzens zu erhalten.

Endlich wird von Greene (20) theoretisch nachgewiesen, wie er durch Verlegung der Kraftquelle in das Serumalbumin des Blutes und Gewebesaftes ausschliesslich, wozu Martius und seine Nachfolger geneigt gewesen sind, gestützt auf seine Experimente mit dem Herzmuskel der Schildkröte, zu ganz absurden Schlüssen über den Blutgehalt des ausgespülten Gewebes kommen würde. Er ist deshalb, wie Gaule der Ansicht, dass der Muskel in sich einen Vorrath von bereits assimilirtem Kraftmaterial besitzt und während der Arbeit von ihm zehrt.

II. Versuchstechnik.[1]

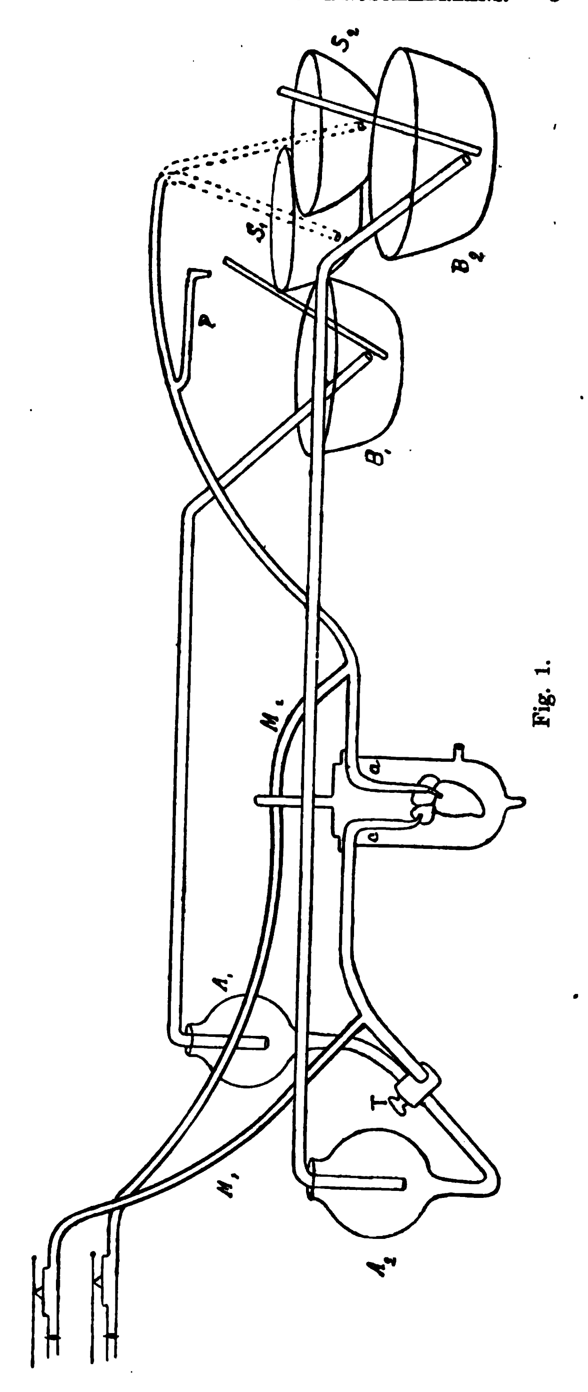
Auf diesem Standpunkte befindet sich augenblicklich die Frage betreffs der substantiellen Bedingungen für den Fortgang der Herzarbeit. Durch eine Reihe Experimente hat Verfasser es versucht, sie ihrer Lösung einen Schritt näher zu bringen. Als Versuchsobject hat dabei ausschliesslich das Herz der Rana esculenta gedient, welches immer, wenn nichts Anderes angegeben ist,[2] als ein Ganzes herauspräparirt und in dieser Form für die Experimente verwandt worden ist. Die technische Anordnung ist die in Fig. 1 wiedergegebene gewesen.

Zwei Reservoire, A_1 und A_2, können, das eine nach dem anderen, mittels des Kranes T mit einer in den rechten Herzvorhof münden den elastischen Leitung in Verbindung gebracht werden, welche nur wenige Centimeter vom Herzen eine starre Seitenröhre nach dem Gummimanometer M_1 abgiebt. Der Flüssigkeitsstrom, welcher wäh-

[1] Die Geräthe sind zum grossen Theil dieselben, welche Prof. Oehrwall im Zusammenhang mit seinen am Froschherzen ausgeführten Erstickungsversuchen beschrieben (19) und die er dem Verfasser freundlichst zur Verfügung gestellt hat.

[2] Betreffend die Technik bei den S. 13, 15 und 23 angeführten Experimenten, wo anstatt dessen die nach Bowditch's Vorbild abgeschnürte Kammerspitze zur Anwendung gekommen ist, sei auf S. 13 verwiesen.

rend der Herzarbeit durch die Aortacanüle *a* herausgetrieben wird, passirt eine neue elastische Röhrenleitung — gleichfalls nahe dem Herzen mit einem Gummimanometer M_2 verbunden — und kann mit Hülfe von Schraubenklammern entweder nach der 10 ^{cm} über dem Flüssigkeitsniveau in A_1 bezw. A_2 befindlichen Zweigmündung P oder nach einer der 3 ^{cm} über demselben A-Niveau befindlichen Flüssigkeitsmassen in den Schalen S_1 bezw. S_2 geführt werden. In diesen letztgenannten ist einerseits für constante Flüssigkeitshöhe, andererseits für den continuirlichen Abfluss der aufgeförderten Flüssigkeit längs einem schräg gegen die Abflussrinne[1] gelehnten Glasstabe nach den darunter liegenden Gefässen B_1 bezw. B_2 gesorgt, welche sie durch communicirende Röhren nach A_1 bezw. A_2 zurückgeben. Es ist also die Möglichkeit vorhanden,


Fig. 1.

[1] Diese ist in der Figur in Folge eines Versehens nicht gezeichnet worden.

durch das Herz auf zwei Wegen: $A_1 T S_1 B_1 A_1$ und $A_2 T S_2 B_2 A_2$ einen geschlossenen Kreislauf zu Stande zu bringen. Die Flüssigkeitsmenge, welche bei den angeführten Experimenten in Arbeit genommen worden ist, hat für jedes System 650 ^{ccm} betragen. Das Herz treibt sie continuirlich nach einem 3 ^{cm} höheren Niveau, von welchem sie passiv zurückkehrt.

Die Präparation des Herzens wird so ausgeführt, dass nach Anbringung von Ligaturen über der Vena pericardiaca, den Venae cavae superiores und dem Truncus arteriosus dexter eine Kanüle durch die Vena cava inferior. mit der Mündung in den rechten Vorhof eingebunden wird, und eine andere durch den Truncus arteriosus sinister mit der Mündung an der Bulbuswurzel. Dann wird die Herzcavität mit Salzflüssigkeit ausgespült, bis letztere farblos abgeht. Das Organ wird in seinem Zusammenhange mit den beiden Lungen herauspräparirt; über jede Lungenwurzel wird eine Ligatur gelegt, und die ausserhalb liegenden Lungentheile werden entfernt.

Mittels über die freien Canülenden gezogener Gummiröhren wird das Herz mit der Leitung in Verbindung gebracht, deren Röhren vorher mit der für die Circulation bestimmten Flüssigkeit gefüllt worden sind. Der Druck auf den Vorhof wird durch Heben und Senken der Canülenfassung auf einem verticalen Stativpfeiler abgepasst. Für rein krystalloide Flüssigkeiten liegt das Druckoptimum in der Vorhofleitung erwiesenermaassen bei 1·5 bis 3·5 ^{cm} Flüssigkeitsdruck, für colloide Lösungen etwas höher — doch nicht über 5 ^{cm}. Wird dieses beobachtet, und vermeidet man es also, den Vorhof mit starkem Druck zu belasten, wozu umso weniger Veranlassung vorliegt, als der Blutdruck im Vorhof zur Lebenszeit keine bedeutende Höhe erreicht, so hat man bei der beschriebenen Anordnung, d. h. bei einem Gegendruck in der Abflussleitung, welcher nicht 8 ^{cm} Flüssigkeit übersteigt, nach der Erfahrung des Verfassers (ungefähr 80 Experimente) nur äusserst selten Insufficienz im Atrioventricularostium zu befürchten, sofern nicht besondere Voraussetzungen für eintretende Schlaffheit der Musculatur vorliegen.

Nachdem das Herz unter geeigneten Druckverhältnissen in den Apparat eingepasst worden ist, wird es von einer zum Gaswechsel mit zwei Ansatzröhren versehenen Glashaube umgeben, durch welche das Gas oder die Gasmischung geleitet wird, welche für die Respiration bestimmt ist. Das Gas hat Zimmertemperatur und wird dadurch feucht gehalten, dass es vor der Hineinleitung eine Waschflasche passirt. Die Temperatur in der Haube wird von einem in der Metallfassung angebrachten Thermometer abgelesen. Besondere Sorgfalt ist dem

Gaswechsel des Herzens gewidmet worden, da es durch Experimente von Rossbach,[1] Langendorff (11) und Oehrwall (19) dargethan worden ist, dass Erstickung Arhythmie oder Schwächung der Herzkraft hervorruft, also in jedem Falle das Resultat der Herzarbeit beeinträchtigt.

Um die Erscheinungen während des Experimentes zu registriren, sind folgende Anordnungen getroffen worden. Die Gummimanometer M_1 und M_2 zeichnen die Druckveränderungen in den Zu- und Ablaufssystemen (den „Venenpuls" und „Arterienpuls") auf den rotirenden Cylinder eines Balzar-Kymographions auf. Die Registrirung wird während stattfindender Circulation ausgeführt und dient hauptsächlich dazu, den rhythmischen Charakter der Herzthätigkeit wiederzugeben. Zufolge des Weitergehens der Circulation parallel mit der Registrirung ist es nur innerhalb gewisser Grenzen gestattet, aus der Grösse der Manometerausschläge die Stärke der Herzarbeit bei verschiedenen Gelegenheiten zu beurtheilen und zu vergleichen. Einer solchen Schätzung wird anstatt dessen die Flüssigkeitsmenge zu Grunde gelegt, welche das Herz bei einer gegebenen Gelegenheit mit jedem Pulsschlage durch die 10^{cm} über dem A-Niveau belegene Reservemündung P hinauszutreiben vermag. Nachdem die Leitung nach S und eventuell der Manometer M_2 abgesperrt worden ist, wird bei P die Flüssigkeit von einer Anzahl (20 bis 100) Pulsen in graduirten Gefässen heraufgeholt, wonach der arithmetische Mittelwerth berechnet wird. Die Veränderungen dieses Mittelwerthes sind es, welche in einigen nachfolgenden Figuren graphisch wiedergegeben werden. Die im Messgefässe heraufgeholte Flüssigkeit wird in das circulirende Flüssigkeitssystem zurückgegeben, oder durch eine neue, ebenso grosse Reservequantität von derselben Flüssigkeit ersetzt.

Mit Kenntniss des Niveauunterschiedes zwischen P und A_1 A_2 (10^{cm}), der Pulscapacität, bestimmt wie oben, und der Pulsfrequenz, wie sie aus den Manometercurven durch Vergleich mit einer gleichzeitig aufgezogenen Zeitcurve hervorgeht, lässt sich für die ausgeführte Arbeit ein Minimalwerth erhalten.

III. Eigene Untersuchungen.

Um systematisch zu erforschen, weshalb die Herzarbeit von der Blutflüssigkeit, aber nicht von der Kochsalzlösung (Kronecker und Stirling l. c.) unterhalten wird, kann man theoretisch zwei Wege einschlagen. Entweder kann man dem Blute die eine Substanz nach

[1] Cit. nach (19).

der anderen rauben und allmählich die neuen Substrate prüfen, bis man zu einem hinuntergekommen ist, dessen Wirkung sich nicht von der des Salzwassers unterscheidet; oder man kann von dem Salzwasser ausgehen und die verschiedenen Bestandtheile des Blutes in dem Verhältniss hinzusetzen, wie sie durch die Blutanalyse dargethan worden sind, bis man ein Substrat erhält, dessen Wirkung nicht von der des Blutes abweicht. In der vorliegenden Arbeit ist aus praktischen Gründen eine Combination dieser beiden Verfahrungsweisen angewandt worden.

Durch McGuire's (5) Experimente ist es bekannt, dass das Kaninchenblut als Mittel, die Arbeit des Froschherzens zu unterhalten, an Wirkung gewinnt, wenn es mit seinem doppelten Volumen physiologischer Kochsalzlösung verdünnt wird. Das Rinderblut verhält sich in dieser Hinsicht in gleicher Weise. Nach Verdünnung mit zwei Volumen 0·7 proc. NaCl-Lösung unterhält es lange reguläre Arbeit seitens des isolirten, in das System eingefügten Herzens. Es wurde deshalb als entschieden betrachtet, dass diese Blutflüssigkeit alle die wichtigsten Vorbedingungen für den normalen Fortgang der Arbeit besitzt, und betreffs der organischen Stoffe war es überdies wahrscheinlich, dass sie in der absoluten und relativen Menge, welche von dem angewandten Versuchsobjecte verlangt wurde, vorhanden waren. Der Plan für den Fortgang der Arbeit war dann der, nach chemischen Analysen eine Salzflüssigkeit zu construiren, entsprechend den Salzen in einem mit zwei Theilen 0·7 proc. NaCl-Lösung verdünnten Rinderblut, aus dieser etwaige unwichtige Ingredienzien auszuscheiden und auf der Grundlage der so nur wesentliche Bestandtheile enthaltenden Restflüssigkeit auf synthetischem Wege die Bedeutung der organischen Stoffe des Blutes zu prüfen.

A. Darstellung einer Lösung der für die Herzarbeit nöthigen Serumsalze.

Aus leicht einzusehenden Gründen hat man bei der Darstellung einer solchen Salzflüssigkeit auf die in der Serumflüssigkeit befindlichen Salze, nicht aber auf die in den Formelementen absorbirten Rücksicht zu nehmen. Unter der Voraussetzung, dass das Serum $^2/_3$ des Blutvolums beträgt,[1] wäre also zur Lösung der ersten Aufgabe eine Analyse der freien Salze im Rinderblutserum nöthig. In Ermangelung einer

[1] Wie Verf. später aus den Untersuchungen Hedin's (*Archiv für d. ges. Physiol.* Bd. LXVIII) erfahren hat, ist das Serumvolumen in der That kleiner als $^2/_3$. Diese Fehlschätzung kann aber für die folgenden Resultate kaum von Belang sein.



solchen war zu hoffen, mit Hülfe der Analysen über die Serumasche, beispielsweise der Bunge'schen,[1] das Ziel erreichen zu können. Ueber diese ist indess zu bemerken, theils dass die Menge der Carbonatkohlensäure natürlich nicht in der Aschenanalyse angegeben werden kann, theils dass die Frage, ob überhaupt, und im Bejahungsfalle, ein wie grosser Theil von den Ca- und Mg-Radikalen in organischer Bindung vorkommt, unbeantwortet gelassen wird, und endlich, dass die Werthe für das Phosphat einer Berichtigung bedürfen, welche auch in den späteren Analysen von Sertoli[2] wiedergefunden wird. Es geschah also mit einem gewissen Zögern, dass Verf. die Flüssigkeit prüfte, welche dadurch entsteht, dass der ganze Alkaliüberschuss als an CO_2 in Form von Bicarbonat gebunden specificirt und die Ca- und Mg-Mengen der Aschenanalyse beibehalten werden. Die Prüfung ergab dennoch ein verheissungsvolles Resultat.

Indess galt es zunächst festzustellen, ob alle die besonderen Ingredienzien in der reconstruirten Lösung der Serumsalze für die Herzarbeit von Bedeutung sind oder nicht. Bei darauf gerichteten Experimenten zeigte es sich, dass weder die Ausschliessung des Mg-Salzes, noch die Abwesenheit des Sulfates eine Einschränkung in der Intensität oder Dauer der Herzarbeit im Gefolge hatte. Diese beiden Radikale wurden deshalb als überflüssig betrachtet und von der ursprünglichen Composition ausgeschlossen, wodurch man eine neue von folgendem Aussehen[3] erhielt:

NaCl	0·65	Proc.
$NaHCO_3$	0·1	„
KCl	0·01	„
$CaCl_2$	0·0065	„
{ Na_2HPO_4	0·0009	„
{ NaH_2PO_4	0·0008	„

[1] In O. Hammarsten, *Lehrb. der physiol. Chemie.* 3. Aufl. S. 111 cit.

[2] Vgl. Hammarsten, *Lehrbuch der physiol. Chemie.* 3. Aufl. S. 111.

[3] Die Bereitung der obenstehenden Lösung geschieht ex tempore aus Stammflüssigkeiten, welche aufbewahrt werden können, die des Bicarbonates doch nur eine kurze Zeit in einer gefüllten, gut geschlossenen Flasche. Eine 1 proc. Stammflüssigkeit von Na_2HPO_4 wird dadurch bereitet dass man 25·21^g Krystalle von der Formel $Na_2HPO_4 + 12H_2O$ (Natrium phosphoricum der deutschen Pharmakopöe) in einem Liter Aqua dest. löst. Von NaH_2PO_4 kann man eine Stammflüssigkeit von derselben Stärke erhalten, wenn 14·9^g derselben Krystalle nebst 20·4^g Phosphorsäure von 20 Proc. H_3PO_4 (Acidum phosphoricum der deutschen Pharmakopöe) in Aqua dest. zu einem Liter Volumen gelöst werden.

Während der Einwirkung der Wasserlösung dieser Salze herrscht bei einem in den Apparat gesetzten Herzen mehrere Stunden lang derselbe allgemeine Contractionstypus, dieselbe Frequenz und derselbe Rhythmus wie bei der Speisung mit Blutmischung (ein Theil Blut und zwei Theile 0·7 proc. NaCl-Lösung). Das Verhältniss zwischen den besonderen Salzmengen spielt eine wichtige Rolle dabei, denn wenn dasselbe verändert wird und man für die Circulation z. B. die von Ringer vorgeschlagene Flüssigkeit[1] wählt, so zeigt das Herz einen anderen Contractionstypus und eine andere Schlagfrequenz (Fig. 2 *A* und *B*).

Bei der Wahl zwischen verschiedenen Salzflüssigkeiten hat man zu berücksichtigen, dass die für das Herz geeignetste auch das nachhaltigste Arbeitsresultat zu geben hat. Um die Einwirkung der leicht diffundirenden Salzlösung eine längere Zeit verfolgen zu können, wird dieselbe mit einer indifferenten colloiden Substanz versetzt, welche das zu schnelle Schwinden der schwerer diffusiblen organischen Stoffe aus der Musculatur verhindert. In einem angestellten Experimente wurden die Salzmengen, welche in der Formel erwähnt werden, in einer 0·75 proc. Lösung von Gelatine aufgelöst, welche durch 14 tägige Waschung mit destillirtem Wasser gereinigt worden war. Mit dieser Flüssigkeit liess man ein während der Präparation durch sorgfältige Ausspülung von Blut möglichst befreites Herz arbeiten. Im Anfang des Versuches betrug das Pulsvolumen 0·20 ^{ccm}, nach 32 Stunden, als der Versuch abgebrochen wurde, noch 0·09 ^{ccm} bei die ganze Zeit hindurch beibehaltener regelmässiger Schlagfolge.[2] Die regelmässige, lange dauernde Herzarbeit zeugt am besten davon, dass die vorgeschlagene Salzlösung als Grundlage für eine artificielle Circulationsflüssigkeit vor anderen bisher geprüften den Vorzug haben muss.

Indess hat sie mit jeder anderen rein anorganischen Flüssigkeit die Eigenschaft gemein, das Herz nicht in der Länge leistungsfähig erhalten zu können. Bei reiner Salzdiät geht die Musculatur unfehlbar einem Stadium entgegen, wo die Dimensionen der Pulsschläge abnehmen. Betreffend die Zeit, welche bis dahin verfliesst, zeigen indess verschiedene Herzen bei vollkommen gleicher Anordnung bedeutende individuelle Variationen. Während das Pulsvolumen bei der Mehrzahl

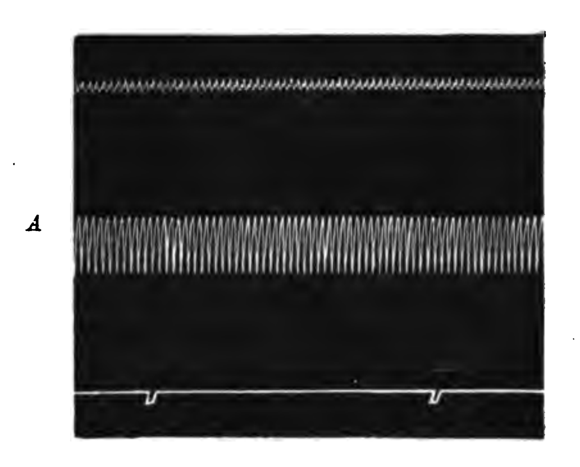
---

[1] Bereitet aus 100 ^{ccm} 0·6 proc. NaCl-Lösung, 1 ^{ccm} 1 proc. $NaHCO_3$-Lösung, 1 ^{ccm} 1 proc. Lösung von $CaCl_2$ und 0·75 ^{ccm} 1 proc. Lösung von KCl.

[2] Dass die Anwesenheit von Gelatine in diesem Falle eine bedeutende Verlängerung des Arbeitsresultates zur Folge gehabt hat, wird bei einem Vergleiche mit solchen Experimenten (siehe z. B. Fig. 4) deutlich, wo dieselbe Salz flüssigkeit ohne Gelatinezusatz angewandt worden ist.

in stetem Sinken begriffen ist, nachdem man angefangen hat, die Salzflüssigkeit hineinzuleiten, erhält es sich bei anderen bis 6 Stunden lang (vom Verf. notirtes Maximum) unverändert trotz der mit der Arbeit fortschreitenden Ausspülung der Blutreste und des Gewebesaftes.

A



B

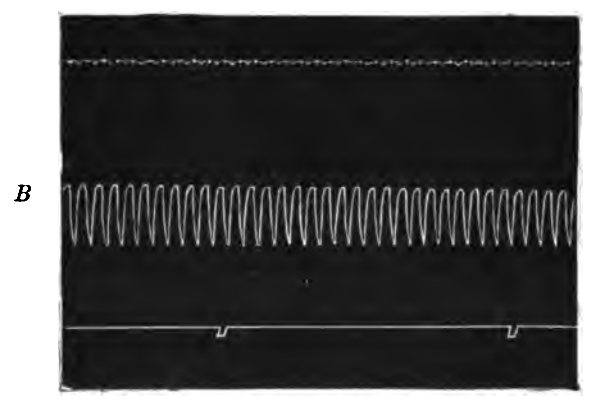


Fig. 2. Manometercurven von einem Herzen, welches bei *A* mit einer Lösung der Serumsalze (nach Ausschliessung von Mg und H_2SO_4), bei *B* mit Ringer's Flüssigkeit arbeitet. Der Vorhof schreibt oberhalb der Kammer. Zeitmarkirung in Minuten.

Der letzterwähnte Umstand, zusammengestellt mit der Erfahrung, dass die für die Ausspülung am leichtesten erreichbare Musculatur des Vorhofes in keiner Weise schneller geschwächt wird als die Kammermusculatur, scheint uns bestimmt dafür zu sprechen, dass es in den Muskelzellen selbst einen seiner Menge nach variabeln Vorrath von

schon assimilirtem Brennmaterial giebt, welcher in dem Maasse in Anspruch genommen wird, wie die Assimilation aus Mangel an Nahrungszufuhr aufhört.

B. Ueber die Bedeutung der besonderen anorganischen Substanzen des Blutes.

In Anbetracht der Weise, wie unsere Salzflüssigkeit erhalten worden ist, muss es als eine gegebene Folge angesehen werden, dass sie in ihrem unveränderten Zustande die Herzarbeit besser unterhält, als wenn eines der in der Composition enthaltenen Salze ausgeschlossen wird. Andererseits ist man berechtigt, im analytischen Interesse einzelne Radikale auszuschliessen. Durch Feststellung der hierbei eintretenden Abweichungen von den normalen Verhältnissen haben wir die Natur der Einwirkung der verschiedenen Salze auf die Herzarbeit darzuthun versucht.

a) Chlornatrium, Alkali und Kohlensäure.

Von allen Salzen des Blutes ist NaCl das gegen das Gewebe indifferenteste, dasjenige, welches mit dem geringsten Schaden eine mit diesem isotonische Concentration zulässt, welche seit Nasse's (1) Untersuchungen als Grundvoraussetzung dafür betrachtet worden ist, dass eine Flüssigkeit den lebenden Geweben günstige Bedingungen darbieten soll. Die Bedeutung des Kochsalzes ist mit anderen Worten die schon lange bekannte, nämlich die, in einer Wasserlösung von geeigneter Stärke ein verhältnissmässig indifferentes Medium zu bilden. Indess ist darin nicht, wie mehrere Forscher stillschweigend angenommen, einbegriffen, dass Chlornatrium die übrigen Salze in anderen Functionen als der osmotischen ersetzen kann. Bald wird hervorgehen, dass dies nicht der Fall ist.

Das Alkali erhöht die Excursionsfähigkeit des mit NaCl-Lösung behandelten Herzmuskels (Stienon, Gaule l. c.). Es ist auch, wie Gaule dargethan, in dem arbeitenden Muskel einem steten Verbrauch unterworfen, weshalb die zusammengelegte Acidität der Verbrennungsproducte diejenige des der Verbrennung unterworfenen Materiales übersteigen muss. Von Interesse ist es dann, zu erforschen, wie die Herzarbeit sich gestaltet, wenn dem Ueberhandnehmen der Acidität kein Hinderniss in den Weg gelegt wird, wenn also kein Alkali, wohl aber übrige, für den Gang der Arbeit erforderliche Salze zugesetzt werden. Bei Versuchen zeigte es sich, dass das Herz mit einer Salzlösung ohne Bicarbonat nur kraftlose, langsame Excursionen um eine halbcontrahirte Mittellage auszuführen, nicht aber seinen Inhalt durch die Leitung hindurch zu treiben vermochte. Die Puls-

frequenz, welche zu Anfang des Versuches 26 betrug, war nach 30 Minuten bei einer Temperatur von 16·5° C. nur 21. Nach zwei Stunden, als noch schwache Contractionen erkennbar waren, ward alkalisirte (0·1 proc. $NaHCO_3$) Salzlösung hineingeleitet, welche die Ausschläge indess nur unbedeutend verstärkte und das Herz nicht zu mechanisch wirksamen Pulsationen befähigte. In der That ist also das Bicarbonat nur wenig geeignet, die Motilität der durch lange dauernden Alkalimangel geschwächten Musculatur wieder herzustellen. Um zu erforschen, ob das Hydroxyd in dieser Hinsicht dem Bicarbonat überlegen ist, wurde ein neuer Versuch gemacht, dieses Mal an einer abgeschnürten Herzspitze, welche mittels einer modificirten Kronecker-Kanüle in den Apparat hineingefügt war. Die Herzspitzencavität mit dem nächsten Theile der Leitung, einschliesslich dem einen Manometer, wurde vom Rest des Leitungssystemes abgesperrt, so dass die Grösse der Manometerausschläge je nach der Stärke der Spitzencontractionen variirt. Die Reizung erfolgte durch Oeffnungsinductionsschläge[1] mit einer Frequenz von 20. Nachdem das Präparat mit neutraler Flüssigkeit eine Stunde lang gearbeitet hatte, wurde constatirt, dass nach Austausch gegen eine mit 0·1 proc. $NaHCO_3$ alkalisirte Flüssigkeit kaum eine Veränderung in der Grösse der Ausschläge eintrat, dass aber eine neue, mit 0,002 proc. NaOH alkalisirte Flüssigkeit Ausschläge erzeugte, welche grösser waren als die zu Anfang des Versuches (die Spülung während der Präparation war mit neutraler Flüssigkeit erfolgt). Bei Einführung der alkalisch wirksamen Faktoren sank die Reizbarkeit des Muskels, so dass stärkere Inductionsschläge nöthig wurden, um die Reizung unfehlbar zu machen.

Trotzdem man es als entschieden betrachten kann, dass das Hydroxyd unter den während des angeführten Experimentes obwaltenden Vorbedingungen wirksamer ist als das Bicarbonat, so folgt daraus nicht, dass es in einer für ununterbrochene Circulation bestimmten Flüssigkeit vorzuziehen sei, umso weniger, als kohlensäurebindendes Alkali erwiesenermaassen die Reizbarkeit der Musculatur heruntersetzt. Als Gaule die dem einfachen Carbonat überlegene Restitutionsfähigkeit des Hydroxydes beobachtete, deutete er diesen Umstand so, dass das Hydroxyd die in den Geweben angesammelte Kohlensäure leichter unschädlich macht. Man hat dann mit weiterer Stütze von Saltet's (7), Ringer's (13) u. A. Untersuchungen über den Einfluss der Kohlensäure auf den Herzmuskel die Bedeutung des Alkalis hauptsächlich als die eines CO_2-bindenden Agens hervorzuheben gepflegt. Um zu erforschen, inwieweit eine solche Auffassung auf das frei arbeitende Herz

[1] Grenet's Element; Blix' Inductorium; Ludwig's Strombrecher, modificirt.

bei gleichzeitiger reichlicher Sauerstoffzufuhr angewandt werden kann, wurden mit Mischungen von Kohlensäure und Sauerstoff in verschiedenen Verhältnissen einige zwanzig Experimente angestellt, von denen einige in den Hauptzügen hier wiedergegeben werden:

Experiment den 12./I. 1899. Salzflüssigkeit (0·65 Proc. NaCl; 0·1 Proc. $NaHCO_3$; 0·01 Proc. KCl; 0·0065 Proc. $CaCl_2$).

Atmosphäre: 80 Proc. Sauerstoff, 20 Proc. Kohlensäure. Temp.: 19° C.

Zeit	Pulsfrequenz	Pulsvolumen
12^h	32	0·215 ccm
1^h 5′	32	0·17
2^h	27	0·19
3^h	25	0·20
4^h 12′	26	0·21
5^h 10′	34	unmessbar klein.

Experiment den 13./I. Salzflüssigkeit (0·65 Proc. NaCl; 0·1 Proc. $NaHCO_3$; 0·01 Proc. KCl; 0·0035 Proc. $CaCl_2$).

Atmosphäre: 90 Proc. Sauerstoff, 10 Proc. CO_2. Temp.: 18·2°.

Zeit	Pulsvolumen
7^h 10′	0·25 ccm
8^h 10′	0·22
9^h 10′	0·20
10^h 10′	0·18
11^h 10′	0·14
14./I. 12^h 10′	0·11
6^h 10′	unmessbar klein.

Die Kammer folgt jeder zweiten Zusammenziehung des Sinus. Von den Vorhöfen sind keine Excursionen zu sehen.

Experiment den 5./I. Salzflüssigkeit (0·65 Proc. NaCl; 0·1 Proc. $NaHCO_3$; 0·01 Proc. KCl; 0·01 Proc. $CaCl_2$), versetzt mit einer geringen Menge von dialysirtem Serum. Temp.; 18·5 bis 15·5° C.

Atmosphäre: Sauerstoff.

Zeit	Pulsfrequenz	Pulsvolumen
2^h 40′	29	0·21 ccm
4^h 23′	33	0·12
6^h 20′	35	0·07
6^h 26′	Atmosphäre von 1 Theil CO_2 und 14 Th. O_2.	
6^h 36′	35	0·14
8^h 42′	33	0·15
10^h 40′	33	0·15
6./I. 2^h 35′	30	0·15
9^h	27	0·06
1^h 5′	28	0·015

In den zwei ersten Experimenten producirt das Herz trotz des steten Einflusses von bedeutenden Mengen Kohlensäure (20 bezw. 10 Proc.) eine bedeutende mechanische Arbeit.

Aus dem zuletzt angeführten Versuche geht hervor, dass das Herz unter gewissen Bedingungen in einer Atmosphäre, welche Kohlensäure in einer Menge von höchstens 7 Proc. enthält, sogar kräftiger arbeitet, als in reinem Sauerstoff. Nachdem der Kraftbestand des Herzens bei Respiration mit reinem Sauerstoff dahin gesunken ist, dass seine Arbeit, nach ähnlichen Fällen zu urtheilen, binnen Kurzem aufgehört haben würde, bewirkte die Einführung der Kohlensäure in die Atmosphäre eine ansehnliche Vermehrung der Arbeitsfähigkeit, so dass das Herz eine neue, mehr als vier Mal grössere Arbeit wie vorher ausführte.

Die Experimente bezeugen einstimmig, dass Kohlensäure bei gleichzeitiger Anwesenheit von einer genügenden Menge Sauerstoff, wie kohlensäuregebundenem Alkali nicht die schädlichen Wirkungen ausübt, wie eine mit Kohlensäure behandelte carbonatfreie Lösung bei gleichzeitigem Fehlen oder Mangel an Sauerstoff. Ein solches Resultat erscheint nicht geeignet, Erstaunen zu erregen, wenn man bedenkt, dass unter physiologischen Verhältnissen im Blute und in noch höherem Grade in den Geweben ein verhältnissmässig bedeutender Kohlensäurepartialdruck herrscht. Ferner berechtigen die Versuche zu dem Schluss, dass das Alkali auch in der Form von Bicarbonat wirksam sein kann, d. h. ohne die Kohlensäure chemisch zu binden, denn ein Arbeitsresultat, wie in dem zuletzt angeführten Experiment, wo der Kohlensäureüberschuss für hinreichend genug betrachtet werden muss, um die Anwesenheit von neutralem Carbonat auszuschliessen, lässt sich nicht mit einer alkali- bezw. alkalicarbonatfreien Lösung erhalten. Es ist anzunehmen, dass das Bicarbonat die nicht flüchtigen sauren Producte der Verbrennung unschädlich macht, welche, obgleich in geringer Menge gebildet (Gaule, l. c.), in ihrem unveränderten Zustande desto nachtheiliger auf die Functionen des Gewebes einwirken würden.

Eine totale Aufhebug der CO_2-Tension ist übrigens unbedingt zum Schaden des Muskels, weil sie von heruntergesetzter oder aufgehobener Irritabilität begleitet wird. Nachstehendes Experiment zeugt davon. Eine Herzspitze wurde mit Salzflüssigkeit, alkalisirt mit 0·002 Proc. NaOH, gespeist und dann im Sauerstoffstrom respirirt. Sie reagirte unmittelbar nach der Einsetzung bei einer Reizungsfrequenz von 21 auf Inductionsschläge vom Valor 42. Nach Verlauf von 27 Minuten waren Reizungen von der Stärke 70

nöthig, um Effect zu erhalten. Nach weiteren 40 Minuten hörte der Muskel auf, auf Reizungen von der Stärke 100 zu reagiren; die letzte Contraction entspricht auf der Manometercurve einer Höhe von 4^{mm} gegen $5 \cdot 5^{mm}$ zu Anfang des Versuches. Nachdem 15 Minuten ohne Reaction auf die angewandten Reizungen verflossen waren, wurde der Sauerstoffstrom abgebrochen und eine Mischung von 95 Proc. O_2 und 5 Proc. CO_2 hineingeleitet. 12 Minuten nach dem Gasumtausch beginnt das Herz mit einzelnen Schlägen auf Reizungen von unveränderter Stärke (100) zu reagiren. Das Präparat wird dann ohne Reizung unter dem Einflusse der Gasmischung gelassen und nach weiteren 2^h 35′, während welcher Zeit der Herzinhalt nicht erneuert worden ist, erweist sich jede Reizung von der Stärke 45 wirksam.

Vom rein mechanischen Gesichtspunkte aus zeigt das Alkali einen besonderen Einfluss auf den Verlauf der Herzdiastole. Am allerdeutlichsten tritt dies bei Alkalisirung mit NaOH in geeigneter Quantität (0·002 Proc.) hervor, am liebsten wenn die Calciummenge auf das Allernothwendigste beschränkt wird, weil NaOH, wie wir später annehmen müssen, einen Theil von dem gebundenen Calcium der Zelle activirt. Unter dem Einflusse einer solchen Alkalisirung wird die Pulsperiode verkürzt, hauptsächlich weil die Dilatation mit einer für den Herzmuskel ungewöhnlichen Schnelligkeit erfolgt. Welche Bedeutung dies für die Labilität und Fähigkeit des Muskels, einer gegebenen Reizungsfrequenz zu folgen, haben muss, ist offenbar.

Wir getrauen uns nicht, die näheren Ursachen zu der Veränderung der Pulsperiode durch das Alkali zu erklären; nur vorschlagsweise sprechen wir die Vermuthung aus, dass das Alkali durch den der Contraction unmittelbar vorangehenden und sie begleitenden chemischen Process eine locale Neutralisation durchmacht, dass diese die Einwanderung einer neuen activen Alkalimenge zur Folge hat, wie dass diese Wiedereroberung eines temporär verlorenen Gebietes Seitens des Alkalis zu den Faktoren gehört, welche den Rückgang des Muskels in die mechanische Ruhelage bedingen.

Bei Ueberführung der gewonnenen Erfahrungen auf das Herz als ganzes Organ sieht man ein, dass dann, wenn die Alkalimenge über eine gewisse Grenze steigt, obschon ohne die chemische Integrität des Muskels zu bedrohen, die Gefahr entsteht, dass ihre die Reizbarkeit herabsetzende Wirkung sich geltend machen wird, und dass diese Gefahr wächst, je mehr die Herzarbeit geschwächt wird. Andererseits darf die Alkalescenz nicht unter ein gewisses Maass gesenkt werden, weil dann Gefahr vorhanden ist, dass die mechanischen Nachtheile von Alkalimangel hervortreten, und diese Gefahr ist um so grösser,

je kräftiger die Herzarbeit fortgeht. Die Quantität Alkali, welche für eine gewisse Arbeitsintensität günstig ist, wird es also nicht unbedingt für eine andere. Dazu kommt, dass das Alkali von einer etwas verschiedenen Wirkung auf die Vorhofs- und Kammermusculatur zu sein scheint. Bei der ersteren giebt die Anwesenheit von Kohlensäure bindendem Alkali (Na_2CO_3, NaOH) erwiesenermaassen Veranlassung zu einer oft excessiven Verstärkung der Contractionen, während bei der Kammer die die Reizbarkeit herabsetzenden Wirkungen einer solchen Alkalescenz bald in den Vordergrund treten. Infolgedessen entstehen leicht Störungen in der Coordination der Herzbewegungen. Auch hat es sich in einzelnen Versuchen gezeigt, dass die Kohlensäure die Vorhofsthätigkeit in Mengen herabsetzt, von denen kaum eine schädliche Wirkung auf die Kammermuskeln verspürt wird. Ob und inwieweit in dieser Hinsicht die verschiedene Dicke der Kammer- und Vorhofswände eine Rolle spielen, muss dahingestellt werden. In einem angeführten Beispiel (13./1. S. 14) hörten die Vorhofscontractionen auf, während der Ventrikel und Sinus noch fortfuhren zu arbeiten. In Sauerstoffatmosphäre dagegen hört die Kammer vor dem Vorhof zu schlagen auf. Endlich scheint es, als ob zu starke Alkalescenz im Verein mit Kohlensäuremangel die Ursache einer Erscheinung wäre, die nicht selten eintritt, wenn das Herz eine Zeit (mindestens $3^1/_2$ Stunden nach der Erfahrung des Verf.) mit der vorgeschlagenen Salzflüssigkeit in reinem Sauerstoff gearbeitet hat. Die Kammer hört dann in einem verhältnissmässig frühen Stadium auf, dem Vorhofsrhythmus zu folgen, und mit regelmässigen Zwischenzeiten von regulären Schlägen trifft es ein, dass ein Kammerpuls synchronisch wird mit folgendem Vorhofspuls, dessen entsprechender Kammerpuls dann ausfällt. Die Inspection des Herzens macht in solchen Fällen den bestimmten Eindruck, dass die Impulse mit einer für den Vorhof geeigneten, für die Kammer allzu schnellen Frequenz kommen. Allmählich compliciren sich die Verhältnisse indessen, weil die Reizbarkeit der Kammermusculatur die Schwelle passirt und Schläge infolgedessen auszubleiben beginnen.

b) Calcium und Kalium.

In den Arbeiten von Merunovicz,[1] Stienon (3) und Gaule (4) findet man die ersten Angaben über Untersuchungen des Verhaltens der quantitativ unwesentlicheren Serumsalze zur Herzarbeit. Aufgemuntert von dem Effect, den sie von kohlensaurem und caustischem

[1] Cit. nach (3) und (4).

Natron erhalten, suchten die beiden letzten Forscher zu ergründen, ob KCl bezw. andere Salze das Alkali ersetzen könnten oder möglicher Weise eine ähnliche Wirkung hätten wie das Alkali. Da bei ihrer Weise, die Experimente anzuordnen, weder das Eine, noch das Andere vermerkt wurde, nahmen sie an, dass nur NaCl und Alkalicarbonat unter den anorganischen Stoffen im Serum von directer Bedeutung für die Herzarbeit wären. Die Unhaltbarkeit ihres Schlusses wurde von Ringer dargethan, welcher in einer grossen Anzahl von Arbeiten das Verhältniss des Kaliums und Calciums gegenüber dem functionirenden Herzmuskel zum Gegenstand sorgfältiger Beobachtungen gemacht hat. Durch diese ist constatirt, dass der abgeschnürte Ventrikel seine Reizbarkeit weit länger behält und grössere Ausschläge macht, wenn diese Salze in dem von Ringer angegebenen Verhältniss anwesend sind, als wenn sie fehlen. Um deren Verhältniss zur Herzarbeit weiter zu erforschen, waren indess Untersuchungen auf das ganze Herz mit der Möglichkeit, gleichzeitig die hierbei verrichtete Arbeit zu bestimmen, wünschenswerth. Aus diesem Grunde wurden folgende Experimente gemacht.

Bei Bereitung einer nach Serumanalysen reconstruirten Salzflüssigkeit wurde $CaCl_2$ vollständig ausgeschlossen, und ein ganzes Herz wurde

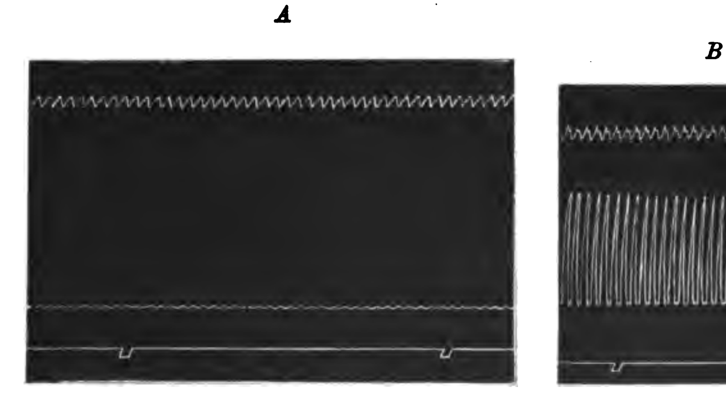


Fig. 3. Manometercurve *A* 11^h 28′ von einem Herzen genommen, welches 23′ mit einer Lösung von 0·65 Proc. NaCl, 0·1 Proc. $NaHCO_3$, 0·01 Proc. KCl gearbeitet hat. Nachdem die Flüssigkeit 11 h 30′ gegen eine neue vertauscht worden ist, welche zugleich 0·0065 Proc. $CaCl_2$ enthält, schreibt das Herz 11 h 33′ die Manometercurve *B*.

dazu gebracht, mit der calciumfreien Restlösung zu arbeiten, deren Wirkung sich schon bei einer gründlichen Ausspülung während der Präparation hatte geltend machen können. Nach Einsetzung in den

Apparat zeigte es sich, dass die Contractionen zu unvollständig waren, um unter den dort herrschenden Druckverhältnissen den Herzinhalt vorwärts zu treiben. Anstatt dessen wurde dann eine gleichartige Lösung, versetzt mit $CaCl_2$ zu 0·0065 Proc., hineinmanipulirt. In Fig. 3 werden graphische Proben der Herzarbeit vor und nach dem Calciumzusatz mitgetheilt; in Fig. 4 werden die Veränderungen des Pulsvolumens skizzirt. Mit Leitung der Figuren findet man, dass das in Folge von Calciummangel geschwächte und zur Arbeit unfähige Herz nur Zufuhr von einer geeigneten Menge Calcium braucht, um eine Arbeit auszuführen, wozu die Anwesenheit der übrigen Serumsalze es nicht geschickt machen kann. Dieser Arbeit gegenüber ist das Resultat unwesentlich, welches im glücklichsten Falle von einem mit nur alkalischer Kochsalzlösung beschickten Herzen erhalten wird.

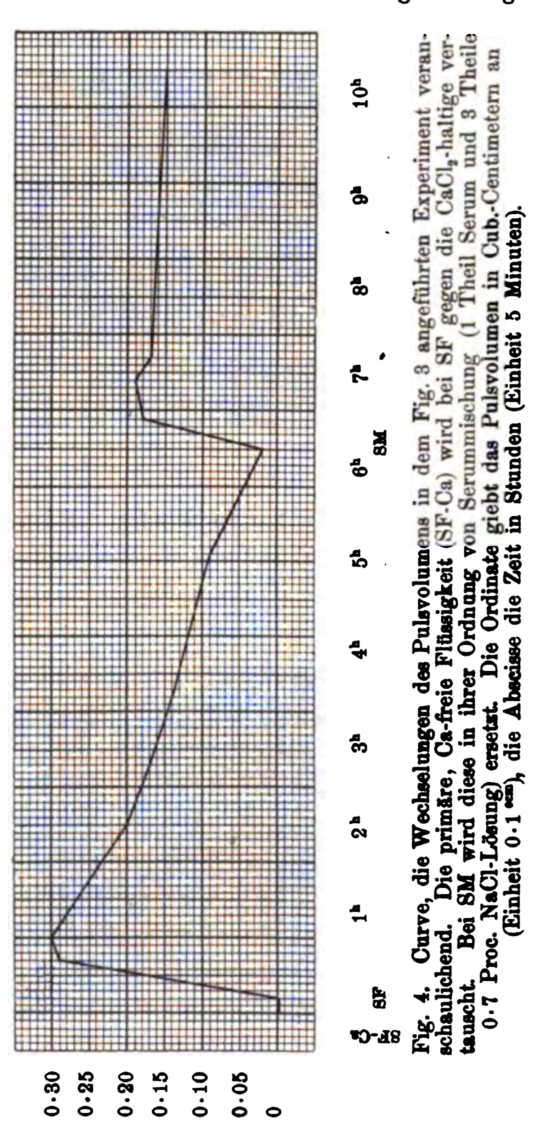


Fig. 4. Curve, die Wechselungen des Pulsvolumens in dem Fig. 3 angeführten Experiment veranschaulichend. Die primäre, Ca-freie Flüssigkeit (SF-Ca) wird bei SF gegen die $CaCl_2$-haltige vertauscht. Bei SM wird diese in ihrer Ordnung von Serummischung (1 Theil Serum und 3 Theile 0·7 Proc. NaCl-Lösung) ersetzt. Die Ordinate giebt das Pulsvolumen in Cub.-Centimetern an (Einheit 0·1 ccm), die Abscisse die Zeit in Stunden (Einheit 5 Minuten).

Ein anderes Experiment wurde der Erforschung des Einflusses von Kaliumsalz auf das Arbeitsresultat gewidmet. Das Herz wurde während der Präparation mit vollständiger Salzflüssigkeit ausgespült und dann in die Leitung eingefügt, um mit Serumsalzflüssigkeit zu arbeiten, die des Kaliumsalzes beraubt war.

2*

Nach einer irregulären Arbeit von circa 5 Minuten, während welcher eine Tendenz zum Ausbleiben jedes 4. Kammerschlages zu bemerken ist, wird (Fig. 5 *A*) regelmässig jeder zweite Kammerschlag geringer und ist nach 2 Minuten auf 0 reducirt. Die Frequenz der Kammerschläge

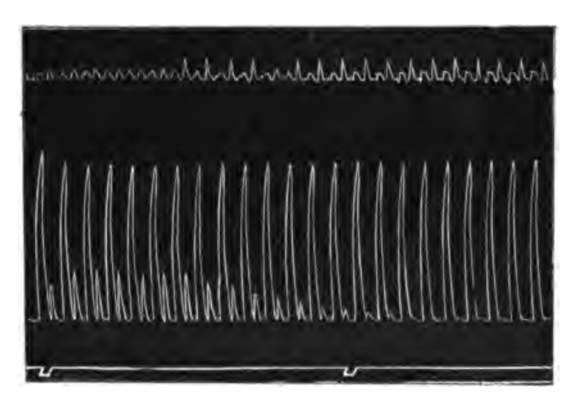


Fig. 5 *A*.

ist auf diese Weise halbirt worden. Nach weiteren 13 Minuten beginnt von den rückständigen Kammerschlägen jeder zweite allmählich abzunehmen (Fig. 5 *B*) gegen ein Minimum, welches nach 6 Minuten erreicht ist. Sowohl während dieser 6 Minuten, wie während der

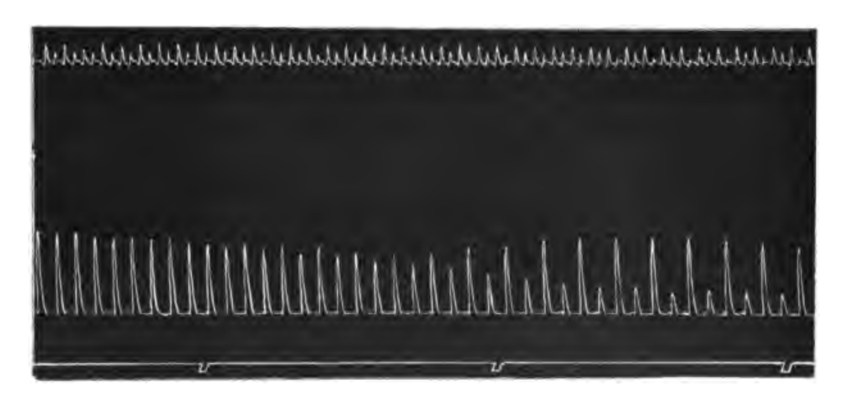


Fig. 5 *B*.

folgenden 17 Minuten (Fig. 5 *C*) wechseln regelrecht ein grösserer und ein kleinerer Ventrikelschlag ab, wobei doch der Unterschied allmählich durch fortschreitende Verminderung des grösseren ausgeglichen wird. Nach ferneren 8 Minuten hat die Herzarbeit an Festigkeit gewonnen (Fig. 5 *D*) unter Anzeigung einer Vorhofsfrequenz von 32,

einer Kammerfrequenz von 16 gleich grossen Schlägen in der Minute. Das Herz ist stark der Systole genähert und der diastolische Act äusserst unvollständig. Allmählich wird dann eine Flüssigkeit hinein-

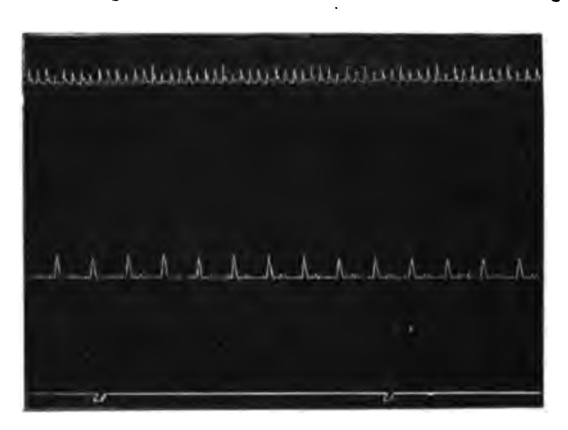


Fig. 5 *C.*

geleitet, welche neben den vorherigen Salzen KCl zu 0·01 Proc. enthält. Binnen 3 Minuten hat die Kammer ihre Frequenz verdoppelt, so dass sie den Vorhofsschlägen folgt (Fig. 5 *E*). Das Herz, welches



Fig. 5 *D.*

eine Zeit lang ohne Flüssigkeitsverpflanzung gearbeitet hat, zeigt nach 10 Min. ein Pulsvolumen von 0·13 ccm, und nach weiteren 35 Min. ein solches von 0·30 ccm (Fig. 5 *F*), und geht zwischen zwei auf einander folgenden Systolen in vollständige Diastole über.

Um einen Einblick in die wirkliche Natur der uncompensirten Calciumwirkung zu erhalten, welche sich in oben beschriebener Weise

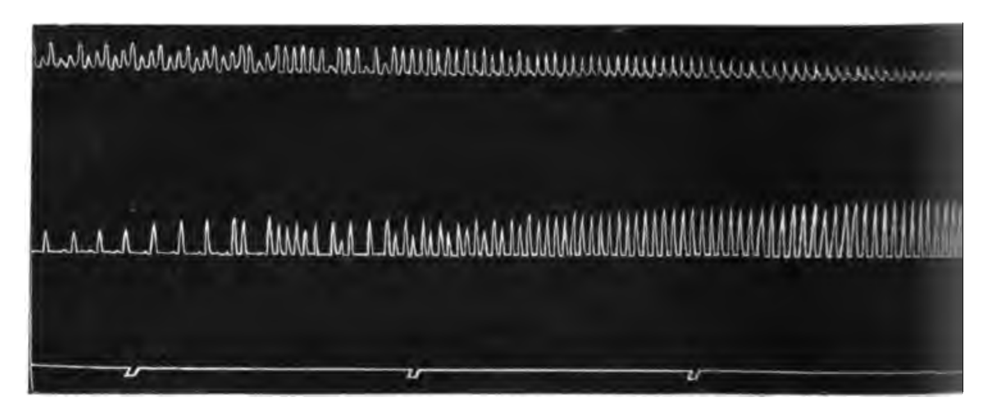


Fig. 5*E*.

auf das ganze Organ äussert, waren Controlversuche an der isolirten Herzspitze nöthig, welche, weil ganglienfrei, nach der allgemeinen Ansicht nicht unter dem directen Einflusse von nervösen Elementen

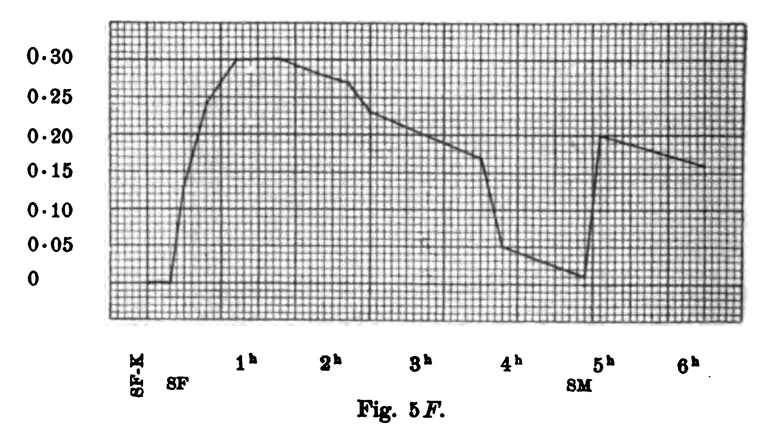


Fig. 5*F*.

Fig. 5. Curve, die Variationen im Pulsvolumen während desselben Experimentes wiedergebend, welchem die Figg. 5 *A* bis *E* entnommen sind. Das Herz arbeitet erst (SF-K) mit einer Lösung, enthaltend 0·65 Proc. NaCl, 0·1 Proc. $NaHCO_3$, 0·0065 Proc. $CaCl_2$. Bei SF wird sie gegen eine neue vertauscht, gleichfalls 0·01 Proc. KCl enthaltend. Bei SM wird Serummischung hineingeleitet.

steht. Die reine Muskelwirkung dürfte also beobachtet werden können, wenn man nur die Impulse von elektrischen Reizen besorgen lässt, deren Stärke und Frequenz nach den Umständen abzupassen man in

der Gewalt hat. Während eines solchen Versuches ist es desto nothwendiger, zugleich die Anforderungen des Herzens auf Alkalescenz der Salzflüssigkeit zu berücksichtigen, da es sich vorher gezeigt hat, dass die Excursionsweite anderen Falles geringer und dadurch ein neuer Faktor eingeführt wird, welcher dahin neigt, die Zuckungscurve zu verändern, und den Schluss auf die specifische Wirkung des Calciumsalzes erschwert. Da diese, nach dem vorhergehenden Versuche zu urtheilen, durch die Anwesenheit von Kaliumsalz maskirt wird, sollte das Experiment also die durch Ausschliessung des Kaliumsalzes einseitig ausgeprägten Calciumwirkungen auf den ganglienfreien Muskel feststellen.

Zu diesem Zwecke wurde eine abgeschnürte, von Blut möglichst befreite Herzspitze veranlasst, ununterbrochen (Frequenz 21) mit KCl-freier Salzflüssigkeit zu arbeiten. Als $1^h\ 15'$ verflossen waren, während welcher Zeit drei Durchspülungen von ein paar Minuten Dauer vorgenommen waren, wurde die Manometercurve von einem einzelnen Pulsschlag gemessen. Dieselbe erstreckte sich über einen Zeitraum von 2·2 Secunden und hatte ihren Gipfel 6^{mm} oberhalb der Abscisse und 1·4 Secunden vom Beginn der Contraction erreicht. Unmittelbar darauf wurde Flüssigkeit, versetzt mit 0·01 Proc. KCl, hineingeleitet und die Zuckungscurve 12 Minuten nach dem Umtausch wieder gemessen. Dieselbe entsprach dann einer Zeit von 1·7 Sec.; der Gipfel lag 0·8 Sec. von Beginn der Pulsperiode und erhob sich $10 \cdot 5^{mm}$ über der Abscisse. Aus dem Versuche geht hervor, dass die Pulsperiode unter dem Einflusse von Kalimangel verlängert wird, während die Excursionsweite abnimmt, und zwar so, dass die Abscisse ihre Lage im Verhältniss zum Gipfel ändert, welcher in beiden Fällen, wie dies auch die unmittelbare Inspection ergab, einer vollständigen Zusammenziehung entsprach. Die Ziffern zeigen deutlich, dass bei Anwesenheit einer physiologischen Calciummenge die Abwesenheit von Kalium die Pulsperiode verlängert, nicht zum Mindesten deren systolische Phase, eher als sie besonders die Diastole verzögert, welch letzteren Schluss Ringer (10) aus Experimenten mit neutraler Flüssigkeit an der in der Atrioventrikulargrenze abgeschnürten Kammer gezogen hat.

Wir erinnern uns nun an den Verlauf bei der Arbeit des spontan thätigen Herzens mit kaliumfreier Flüssigkeit. Das Stadium der uncompensirten Ca-Wirkung lässt sich dort kurz als eine oscillatorische Näherung an systolischen Krampf charakterisiren, der indess nicht vollständiger wird, als dass man noch auf dessen Kulminationspunkt bestimmte, wenn auch sehr kleine Contractionen unterscheiden

kann.[1] Die Veränderungen in der Frequenz der Kammerschläge deuten an, wenn man sie mit den eben an der Herzspitze erhaltenen Resultaten zusammenstellt, dass mit fortschreitender Elimination des Kaliumsalzes die Pulsperiode der Kammer allmählich verlängert wird und in immer grösseres Missverhältniss zu den mit unverändertem Intervall fortgehenden Reizungen geräth. Der Mangel an Coordination zwischen Vorhof und Kammer, welche Störung endlich in regelrechter Weise stationär wird, scheint ihren Grund darin zu haben, dass die Pulsperiode bei der Vorhofsmusculatur nicht in entsprechendem Grade verlängert wird. Der Wechsel in den Excursionen der Kammer, welche unter den obwaltenden Verhältnissen vollständig von dem Erschlaffungsgrade während der vorhergehenden Diastole abhängen, dürften am einfachsten so zu erklären sein, dass die Impulse in Folge der Verschiebung zwischen Pulsperiode und Reizungsintervall auf verschiedenen Punkten der Ausdehnungsphase angreifen. Die Wiederherstellung eines geeigneten Kaliumgehaltes bei der Flüssigkeit begrenzt die Pulsperiode der Kammermusculatur auf ihre normalen Dimensionen, so dass vollständige Diastolen vor der nächsten Reizung erfolgen können; damit kehrt die Möglichkeit wieder, auf jeden Impuls zu respondiren, und das mit vollständigen, gleich grossen Schlägen zu thun.

Sowohl betreffend das ganze Herz, wie dessen ganglienfreie Musculatur ist also dargethan, dass die Menge Calciumsalz, mit welcher sie eine normale Arbeit ausführen können, sofern gleichzeitig Kaliumsalze vorhanden sind, im entgegengesetzten Falle dieselben in einen Zustand versetzt, wo die Bedingungen der Contraction in höherem Grade als sonst erfüllt zu sein scheinen, während die Wirkung der ausdehnenden Kräfte nicht in entsprechendem Grade verstärkt wird.

c) Erörterung des Verhaltens der Ca- und K-Radikale zu den inneren Processen bei der Function des Herzmuskels.

Obgleich eine Erklärung dieses eigenthümlichen Umstandes bei der unvollständigen Kenntniss, die wir von allen subtileren Processen bei der Muskelcontraction haben, äusserst schwierig ist, scheint ein Versuch, dieselbe unter generellere Gesetze zu bringen, nicht ohne Be-

[1] Die Figg. 5 *A* bis *E* geben in Folge der Unvollkommenheit in der Registrirungsanordnung kein ganz übersichtliches Bild von dem Verlauf, weil die Manometercurve auch bei den äusserst unvollständigen Diastolen zu der Abscisse hinuntersinken kann. Was man eigentlich übersieht, ist also die Stärke der Herzsystolen, ausgegangen von einer für verschiedene Grade von Diastole gemeinsamen Abscisse.



rechtigung zu sein. Wir gehen dabei von der Thatsache aus, dass dann, wenn Stromfluctuationen von hinreichender Stärke und Schnelligkeit in dem functionell intacten Muskel erfolgen, in diesem eine Contraction ausgelöst wird. Nun ist die Muskelcontraction — darüber dürfte nur eine Meinung herrschen — ihrer Natur nach ein mechanischer Act, entstanden auf der Grundlage eines chemischen Processes. Der Verlauf zwischen der elektrischen Reizung und der vollendeten Contraction muss deshalb zwei nach Art und Inhalt ganz verschiedene Processe enthalten: einen, wodurch der elektrische Impuls einen chemischen Verlauf auslöst, wie einen anderen, wodurch der chemische Verlauf in einem mechanischen Effect resultirt, d. h. sich in einer Muskelcontraction zu erkennen giebt. Zur Erklärung des letztgenannten Actes sind die detaillirtesten Hypothesen aufgestellt worden; es ist daher um so befremdender, dass der ersten Frage verhältnissmässig so wenig Aufmerksamkeit geschenkt worden ist.

Wenn eine elektrische Stromfluctuation, welche den Muskel durcheilt, functionelle Umwälzungen in dessen ganzer Ausdehnung bewirkt, so kann dies vom Standpunkte einer energetischen Anschauung nicht anders gedeutet werden, als dass ein Theil der elektrokinetischen Energie in andere Kräfte transformirt wird, welche den chemisch-mechanischen Folgen der Reizung zu Grunde liegen. Nun wird jede solche Transformation verhindert, wenn der Muskel die Energie des elektrischen Stromes unverändert hindurchliesse. Es muss also ein gewisser Grad von Widerstand im Muskel vorausgesetzt werden, der so localisirt ist, dass die in neuer Form auftretende Energie nicht einem kleinen Gebiete, sondern jeder functionellen Einheit innerhalb der Zelle zu gute kommt. Stellen wir uns nun dergleichen Widerstände vor, angebracht in den Muskelzellen bezw. deren longitudinellen Elementen in mit bestimmten Intervallen wiederkehrenden Quersegmenten, so müssen die Verhältnisse in und bei diesen Quersegmenten für eine Transformation der Energie besonders günstig sein.

Wie aber ist die Entstehung von Leitungshindernissen im Muskel zu erklären? Die Leitfähigkeit eines lebenden Gewebes ist wesentlich eine Function der elektrolytischen Zustände seiner Salze. Ein Hinderniss für die Fortleitung des Stromes durch den Muskel muss daher nach der Anschauung der elektrolytischen Dissociationstheorie über die Natur des Stromes in der Hauptsache gleichbedeutend sein mit einem Hinderniss für die Wanderungen der einzelnen Ionen. Dadurch, dass wir den erwähnten Quersegmenten eine gewisse Widerstandsquantität zuerkennen, und zwar derart, dass jene während des fortgehenden Stromes eine Arretirung gewisser Ionen bedingen, sind in der That nur die Vor-

aussetzungen für die Localisirung des Leitungswiderstandes genauer präcisirt worden. Für ein Verständniss der Natur der der Arretirung unterworfenen Ionen müssen die angeführten experimentellen Resultate bestimmend werden. Da diese nun unzweideutig zeigen, dass die Ca-Salze ganz besonders nöthig für die durch Reizung ausgelöste Phasenveränderung, die Systole, sind, wollen wir, vorläufig ohne einen anderen Grund, die Annahme wagen, dass der Widerstand von für Ca-Ionen impermeablen Quersegmenten[1] verursacht wird. In demjenigen Augenblick, wo ein elektrischer Strom von genügender Dichtigkeit durch den Muskel geschlossen wird, werden die Ca-Ionen nach der Oberfläche der genannten Septa orientirt und bilden dort eine elektropositive Schicht. Verhielte sich nun die Substanz im Septum den Ca-Ionen gegenüber als ein Dielektricum, und ginge sie ohne Unterbrechung in ein gleichartig dielektrisches, die Zelle bekleidendes Mantellager über, so tritt im Orientirungsaugenblicke eine dielektrische Verschiebung ein, welche, vorausgesetzt, dass die Dicke des Sepiments verschwindend ist, dieses unter peripherischer Verschiebung der positiven Elektricität in correspondirendem Grade elektronegativ macht. Nun ist indess bekannt, dass unter dem Einflusse einer schnell wachsenden oder schnell sinkenden dielektrischen Polarisation Atomumlagerungen in stabilen neutralen Systemen geschehen können. So kann bei der Entladung eines Conductors ein Theil der Sauerstoffmolecüle des angrenzenden Luftlagers in Ozonmolecüle übergehen, also in ein System von grösserer Labilität. Es ist denkbar, dass in den Muskelzellen unter dem Einflusse einer schnell eintretenden Ionenarretirung ähnliche Fluctuationen des Potentials in den elektrolytischen bezw. dielektrischen Systemen eine gleichartige Auflockerung der Bindungen erzeugen, mit anderen Worten chemische Processe auslösen können, welche für ihre Entstehung einen Zuschuss von Energie verlangen, dann aber unter Umsetzung einer grösseren Energiemenge verlaufen.

Wenn sich nun unter den intracellulären Kationen zugleich einige fänden, welche durch den ganzen Inhalt des Zellkörpers der Stromrichtung folgen, bezw. den Strom fortleiten können, so ist es offenbar, dass in demselben Maasse, wie deren Concentration gross ist, das Hinderniss, welches der Fortleitung des Stromes entgegengesetzt wird in Folge des eigenartigen Verhaltens der Ca-Ionen, unwesentlich wird.

[1] Wenn hier und im Folgenden von einer Impermeabilität für gewisse Ionen gesprochen wird, so wird dabei nicht in Abrede gestellt, dass sie während eines hinreichenden Zeitraums durchdringen können; nur wird vorausgesetzt, dass ihre Wanderungsgeschwindigkeit an jenen Quersegmenten ausserordentlich beeinträchtigt wird.



Unter der Annahme, dass die K-Ionen zu dieser Kategorie gehören und einen quantitativ bedeutenden Theil davon repräsentiren, erhält man eine dem Anscheine nach befriedigende Erklärung auch von dem Verhalten der Kaliumsalze zur Herzarbeit.

Wenn eine mit dem Gewebe isotonische KCl-Lösung den Herzmuskel lähmt, sollte dieser Umstand also vom physikalischen Standpunkte aus bedeuten, dass die Anzahl der frei beweglichen K-Ionen dabei wächst, wesentlich auf Kosten der Ca-Ionen, in einer Weise, welche die Voraussetzung für einen localen Effect des Impulses zu nichte macht. Eine physikalisch gleichartige NaCl-Lösung verhält sich indess physiologisch abweichend, denn obgleich auch deren Einwirkung auf des Herz ihrem Wesen nach eine langsam fortschreitende Lähmung ist, so waltet doch ein bedeutender Unterschied bezüglich der für das Schwinden der Reaction erforderlichen Zeit vor. Wir sind also genöthigt, einen Unterschied zwischen den Na- und K-Ionen in deren Verhalten zum Muskel anzunehmen. Der Unterschied soll nach den Voraussetzungen, von welchen wir ausgegangen sind, in einem verschiedenen Antheil dieser Ionen in der Fähigkeit der Zelle den elektrischen Strom fortzuleiten, bestehen. Nun zeugen die meisten Analysen davon, dass Serum und Lymphe, wie die thierischen Säfte überhaupt, arm an Kalium, aber reich an Natrium sind. Die Muskeln aber erweisen sich reich an Kalium, dagegen arm an Natrium. Es ist also klar, dass die Muskelzelle während des Lebens durch selectiv wirksame Kräfte sich aus der spärlichen Zufuhr von Kali einen grossen Vorrath, von dem in reichlicher Menge zu erhaltenden Natron nur einen geringen Vorrath bereitet, oder mit anderen Worten, die Muskelzelle nimmt, figürlich gesprochen, mit grösserer Begehrlichkeit Kalium auf und behält es auch fester als Natrium. Wenn sich die Vertheilung aber nach diesen Gesetzen in dem intacten Organismus gestaltet, so ist die grösste Wahrscheinlichkeit vorhanden, dass dieselben Gesetze die Wechselwirkung des überlebenden Herzmuskels mit einer dem Serum oder der Lymphe entsprechenden Salzlösung bestimmen. Das Kalium dürfte also unter den Elektrolyten in der Zelle eine ganz andere und wesentlichere Rolle als in der Gewebsflüssigkeit ausserhalb der Zelle spielen können, und es ist die Verschiedenheit in der Permeabilität, welche vor Allem bestimmt, dass äquivalente Lösungen von zwei einander so nahestehenden Elektrolyten wie KCl und NaCl Wirkungen von verschiedener Intensität in der Zelle erzeugen, ein Umstand, der, wie man vermuthet, von einer „Giftwirkung“ des Kaliums zeugt.

Wir erinnern uns, dass eine Flüssigkeit ohne Kalium, aber eine

physiologische Calciummenge enthaltend, die Pulsperiode verlängert. Die Ursache dazu ist zunächst in einer Verschiebung der Vertheilung der Elektrolyten nach den diosmotischen Gesetzen zu suchen, welche in dem äusseren Grenzlager der Zellen herrschen. Nicht nur, dass ein für die Zelle fortschreitender Verlust von Kalium an die umgebende kaliumfreie Salzflüssigkeit stattfindet; der Verlust muss compensirt werden, und dies geschieht zum Theil durch erhöhte Aufnahme von Calcium. Beide Processe tragen dazu bei, den Widerstand gegen die Fortpflanzung des Stromes durch den Muskel zu erhöhen und als Folge davon bei gegebener Stromintensität die assimilatorische Reizung zu vermehren. Davon die erhöhte Tendenz zu einer systolischen Lage, welche, da die Angriffe seitens der dilatatorischen Kräfte unverändert bleiben, leicht als erschwerte Diastole gedeutet wird. Ein Zusatz von Kalium in geeigneter Menge reducirt das Leitungshinderniss auf die gebührlichen Dimensionen, mindert die Stärke der Verbrennung, deren Abhängigkeit von dem Leitungswiderstande wir als selbstverständlich vorausgesetzt, und stellt dadurch das Gleichgewicht zwischen der Verbrennung selbst und den ihre Folgen aus dem Wege räumenden Faktoren wieder her.

Zum Schluss, sobald die Calciumsalze des Herzmuskels an die Umgebung verloren gehen, tritt ein Zustand ein, wo zuerst die Kraft continuirlich ermattet und zuletzt, wenn die physikalische Unterlage für die Effectivirung des Reizes fehlt, die Reizbarkeit verschwindet.[1]

Ein Einwand, welcher gewiss gegen die aufgestellte Erklärung vorgebracht wird, ist der, dass diese den Calciumsalzen eine so wesentliche Rolle zuertheilt, dass eine normale Herzbewegung ohne sie nicht möglich ist. Nun scheint diese Annahme anfänglich von mehreren allgemein bekannten Umständen in glänzender Weise widerlegt zu sein. Weit entfernt davon, dass die Nothwendigkeit des Calciumsalzes für die Muskelfunction sich augenblicklich zu erkennen giebt, erforderte es besondere Sorgfalt, um dessen günstige Wirkung überhaupt nachweisen zu können, und Mancher stellt nicht einmal diese ausser allem Zweifel. Man hat ja schon längst gefunden, dass das Herz eine Zeit lang fungirt, gespeist mit reiner Kochsalzlösung, ja dass es, nachdem es seine Irritabilität in dieser Lösung verloren hat, durch Alkali-

[1] Eine ähnliche Ursache bin ich geneigt, den Ermüdungserscheinungen, die in Folge protrahirter Arbeit, zumal bei gleichzeitig ungenügender Circulation und Sauerstoffzufuhr auftreten, zu Grunde zu legen, und zwar würde die Säurebildung, welche den dissimilatorischen Process begleitet, die Anzahl der mit grosser Geschwindigkeit ausgestatteten Wasserstoffionen vermehren, demnach unter den Kationen die Procentanzahl Ca-Ionen herabsetzen.



zufuhr zu erneuter Function erweckt werden kann. Indess, wenn das Herz bei guter Durchspülung mit NaCl-Lösung dennoch die Fähigkeit zeigt, eine Zeit lang zu functioniren, so ist dies eine Folge von unter Anderem dem Umstande, dass eine gewisse Zeit erforderlich ist, bis die löslichen Calciumsalze durch Diosmose vollständig entfernt sind. Es ist von diesem Gesichtspunkte aus eher trotz, als in Folge der Anwesenheit der Kochsalzlösung, dass die Reizbarkeit eine Zeit lang erhalten bleibt. Die Reizbarkeit kehrt aber bei Zufuhr von activem Alkali zurück, und die Ausschläge können zur normalen Höhe anwachsen. Ist nicht dieser Umstand ein Beweis dafür, dass das Herz ohne Calciumsalz arbeiten kann? Wir müssen bei näherer Prüfung bestreiten, dass dies der Fall ist, und zwar aus den folgenden Gründen. In der Zelle ist das Calcium wahrscheinlich sowohl als disponibler Elektrolyt vorhanden, als auch in Combinationen von nicht dissociirter Natur, in Combinationen, welche von der hauptsächlich auf osmotischem Wege wirksamen NaCl-Lösung nicht gestört werden. Wird diese aber mit Alkali versetzt, so wird das Verhältniss ein anderes. Unter dem Einflusse der reactionsfähigen Radikale wird das gebundene Calcium zum Theil aus seinen Verbindungen gelöst. Die dabei freigemachten Ca-Radikale sind nunmehr Elektrolyten. Allmählich werden diese indess durch Diosmose mit der calciumfreien Circulationsflüssigkeit eliminirt, und es würde bald Mangel entstehen, wenn nicht die Verminderung selbst in Folge des diosmotischen Austausches es mit sich brächte, dass neue je nach dem Vorrath durch Massenwirkung freigemacht werden. Zwei Processe greifen also mit dem Resultat in einander, dass eine Zeit lang eine gewisse Menge Calciumionen in der Zelle anwesend sind. Wenn das active Alkali (das Hydroxyd, in niedrigerem Grade das Carbonat) ein in NaCl-Lösung geschwächtes Herz rehabilitirt, liegt also nicht nur eine directe Wirkung der wieder hergestellten Alkalescenz vor, sondern auch das Resultat von der Freimachung der Ca-Radikale durch Massenwirkung. Einerseits werden wir also zu einer von Gaule's theilweise abweichenden Auffassung von den Ursachen zur Restauration durch Alkali gebracht, andererseits erscheint nunmehr die Ueberlegenheit des Hydroxydes über das Carbonat und Bicarbonat in einem anderen Lichte.

Von der Hypothese ausgehend, dass die Wanderungen der K-Ionen innerhalb der Zelle frei, die der Ca-Ionen dagegen auf ein Gebiet zwischen zwei für sie impermeablen[1] Septa beschränkt sind, ist es uns möglich gewesen, die im Vorstehenden experimentell festgestellten Phänomene unter einen einheitlichen Gesichtspunkt zu bringen. Sollte

[1] Vgl. Fussnote S. 26.

durch fortgesetzte, vor Allem auf die Bestimmung der Leitungsfähigkeit des Muskels unter verschiedenen Salzregimen gerichtete Studien sich die Annahme in Bezug auf das angewandte Versuchsobject als haltbar erweisen und dasselbe Verhältniss bei comparativen Prüfungen sich bei anderen Formen der Musculatur wiederfinden, so würde dadurch ein tieferer Einblick in das eine oder andere bislang dunkle Phänomen in der Muskelphysiologie gewonnen werden. So würden Variationen in der Menge der K- und Ca-Ionen unter einander im Verein mit Variationen der Entfernung zwischen den semipermeablen Quersegmenten erklären können, weshalb einige Muskeln sich langsam, andere schnell contrahiren. In der That findet man schon beim Vergleich zwischen der Zuckungscurve eines Herzmuskels unter Kaliumkarenz und der eines trägen Muskels unter normalen Verhältnissen eine schlagende Formgleichheit.

Es dürfte auch auseinandergesetzt zu werden verdienen, wie man mit der Annahme einer Ionenarretirung als Ausgangspunkt den Ursprung der Negativitätswelle zu erklären hat, welche die Reizung begleitet und deren Auftreten im Herzmuskel des Frosches von Burdon-Sanderson und Page[1] festgestellt worden ist. Man denke sich, dass im Reizungsmomente eine Schicht elektropositiv geladener Ca-Ionen gegen die Oberfläche eines Sepimentes arretirt wird, das dadurch in einen Zustand von dielektrischer Polarisation geräth. Zunächst der von Ca-Ionen belegten Oberfläche entsteht nach der traditionellen Ausdrucksweise der Symmer'schen Anschauung eine ungleichnamige, elektronegative Ladung, während die gleichnamige Elektricität in Folge der geringen Dicke des Sepimentes peripherisch verschoben wird, d. h. hinaus in das Mantellager der entsprechenden Zelle, dessen Aufbau von einer ähnlichen dielektrischen Substanz man wohl voraussetzen darf.[2] Hieraus folgt, unter der Annahme, dass der Muskel intakt und parallelfaserig ist, dass auf dessen Oberfläche das niedrigste Potential (die grösste negative Ladung) sich mitten gegenüber dem in der Reizung begriffenen Gebiete befindet, das höchste Potential (die grösste positive Ladung) in einiger Entfernung davon im ruhenden Gebiete. Bei Anlegung der gebräuchlichen Elektroden auf ruhendem und gereiztem Muskelterritorium wird also auf der letzteren Berührungsstelle eine elektromotorische Kraft mit positiver Richtung von der Elektrode nach der Muskeloberfläche erzeugt, auf der ersteren dagegen eine elektromotorische Kraft in umgekehrter Richtung. In der äusseren

[1] *Journal of Physiology.* Vol. 2 u. 4.

[2] Diese Frage wird vom Verf. in einer folgenden Arbeit eingehender behandelt werden.

Bahn entsteht dann infolge der Ionenentladung von den feuchten Elektroden nach dem dort befindlichen Leiter erster Ordnung ein Strom von positiver Elektricität von dem ruhenden zum gereizten Muskelgebiete. Die Negativitätswelle wäre also als der sichtbare Ausdruck für eine unter dem Einflusse des Impulses entstandene dielektrische Verschiebung in einem von den beschriebenen Strukturformationen gebildeten System aufzufassen. (Verf. hofft in kurzer Zeit die Gründe darlegen zu können, die für einen ähnlichen Bau der Nervenfaser sprechen, d. h. für das Dasein eines dielektrischen und eines elektrolytischen Systems, die beide an der Fortpflanzung der Actionswelle theilnehmen.)

Die Fortpflanzung der Reizung innerhalb der Zelle wird, gestützt auf die Annahme einer Ionenarretirung, nach folgenden Principien erklärt. Sobald unter dem Einflusse einer adäquaten Reizung des Nerven oder eines experimentell entstandenen schnellen Potentialwechsels in negativer Richtung an einer Stelle, z. B. in der Nähe des Aequators, eine Erregung stattgefunden hat, d. h. Ca-Ionen nach der Oberfläche hin von den dem Angriffspunkte der Reizung am nächsten gelegenen Sepimenten orientirt worden sind und durch dielektrische Polarisation ein negatives Potential innerhalb dieser Sepimente aufgewachsen ist, so tendirt dieser Reizungszustand dahin, sich nach den beiden Polen der Muskelzellen hin, und zwar aus den folgenden Gründen fortzupflanzen.

In Folge des Angriffes der Reizung auf der Reizstelle tritt in dem dielektrischen System der Muskelzelle (Sepimente und Mantellager) eine Verschiebung ein, welche das Mantellager und die Sepimente auf beiden Seiten des Erregungsgebietes schwächer negativ, bezw. stärker positiv als in der erregten Zone geladen macht. In Folge dessen entsteht eine elektromotorische Kraft, welche danach strebt, die Ca-Ionen wie andere Kationen in der Richtung von dem höheren nach dem niedrigeren Potential zu verlegen, d. h. von den Polen nach dem gereizten äquatorialen Gebiet. Indem diese Verschiebung stattfindet, schreiten die Erregungswellen gegen die Pole fort, einen steten Wechsel des Polarisationszustandes schaffend. Der Grund dazu, dass die Erregung am Pole nicht recurrent wird, ist wahrscheinlich der, dass die Ca-Ionen in den vom intracellulären Strome zuletzt durchlaufenen Intervallen noch von der Reizung aus der entgegengesetzten Richtung orientirt sind, und dass, wie leicht einzusehen, grössere Kraft erfordert wird, um dieselben von dieser extremen Lage nach der entgegengesetzten zu orientiren, als wenn sie im Intervalle gleichmässig vertheilt wären, wie dass endlich die orientirende Kraft, welche in Folge des Polarisationszustandes noch

existirt, unter allen Umständen zu schwach ist, die Reizungswelle allein zu reflectiren. Die dielektrische Polarisation strebt dann aus eigener Kraft nach Ausgleichung; die an den Polen befindlichen Sepimente, welche zuletzt gereizt gewesen sind, nähern sich vom negativen Potential direct der neutralen Lage, während diejenigen in den äquatorialen Gebieten der Zelle, welche zuvor positives Potential hätten annehmen müssen, nun mit Aufhebung der Reizung danach streben, ihre Neutralität wieder anzunehmen. Dabei verschwinden die Kräfte, welche die Ca-Ionen orientirt haben; diese kehren zu einer disseminirten Ausbreitung zurück, und es tritt Ruhezustand ein.

Die principielle Bedeutung der angeführten Auseinandersetzungen machen es wünschenswerth trotz der Knappheit des Materiales, unter Heranziehung der Thatsachen, welche vorgebracht werden können, die Voraussetzungen unserer Annahme näher zu prüfen.

Die Struktur des Froschherzmuskels zeigt eine für die optischen Hülfsmittel ziemlich markirte Querstreifigkeit und spricht insofern direct für die Annahme von Quersegmenten verschiedener physikalischer Eigenschaften. Andererseit ist zu bemerken, dass eine Theilung der Muskelzelle in Gebieten von verschiedener Permeabilität kaum eine gleichzeitige Theilung in Gebieten von verschiedener Brechbarkeit voraussetzt.

Von grösstem Interesse ist die Frage, ob man überhaupt Substanzen kennt, welche in Uebereinstimmung mit der Annahme von den Septa der Muskelzellen für Ionen einer Qualität impermeabel, für andere aber permeabel sind, und zwar besonders, wenn solche Substanzen im Thierreiche vorkommen. So scheint es wirklich der Fall zu sein. Traube[1] fand, dass die auf der Grenzfläche zwischen einer Lösung von Kupferacetat und einer von Ferrocyankalium entstehende membranöse Fällung für Wasser permeabel ist, nicht aber für verschiedene darin gelöste Salze. Später betonte Ostwald (12), dass bezüglich solcher semipermeabler Membranen keine verschiedene Permeabilität für die Salze als solche, sondern für die den Salzen entsprechenden elektrolytischen Dissociationsproducte, die Ionen, vorauszusetzen sei. Gegen diese Auffassung hat allerdings Tammann (15) erwidert, dass in einer Anzahl von ihm ausgeführter Experimente keines von den Radikalen eines Salzes passirt hat, trotzdem es sich gezeigt hat, dass entsprechende Ionen bei Controlversuchen hervordringen können, wenn sie aus einer anderen Verbindung dissociirt worden sind. Indess ist es von Ostwald experimentell nachgewiesen, dass eine Membran für

[1] M. Traube, Experimente zur Theorie der Zellenbildung und Endosmose. *Arch. f. Anat., Physiol. u. wiss. Med.* 1867. S. 87.



die eine Ione eines binären Systemes impermeabel, für die andere aber unter gewissen Bedingungen permeabel sein kann. Als eine Membran dieser Art erwies sich die obengenannte, welche SO_4 und K, nicht aber Cu und $Fe(CN)_6$ durchlässt.

Indess sind Beweise für die Anwesenheit von semipermeablen lebenden Zelltheilen wünschenswerth. Aber ebenso natürlich wie es ist, dass die allgemeinen Gesetze für die Wanderungen der Elektrolyten von einem Medium zum anderen Geltung haben bei der Wanderung der unorganischen Radikale durch die Zellenmembran, das Wandplasma u. s. w., ebenso schwer ist es, im Einzelnen den Verlauf eines solchen Processes festzustellen. Darauf ausgehende experimentelle Eingriffe sind zwar nicht ausgeschlossen, aber stets mit unvermeidlichen Fehlerquellen behaftet. Ein solcher Einwand lässt sich dagegen nicht gegen diejenigen Resultate erheben, welche sich bei vergleichenden chemischen Analysen von zwei so relativ ohne Eingriffe isolirbaren Substraten wie den rothen Formelementen des Blutes und dem Plasma ergeben können. Von beiden liegen Analysen[1] vor, aus welchen hervorgeht, dass, während das Plasma zwar nicht bedeutende, für die Analyse aber vollkommen hinreichende Mengen Ca enthalten hat, von welchen ein Theil unzweifelhaft in dissociirter Form vorgekommen ist, bei den rothen Blutkörperchen von demselben Blute dieses Element gefehlt hat. Da die Blutkörperchen während des Lebens einem steten osmotischen Austausch mit dem Plasma unterworfen sind, muss ein Grenzlager oder vielleicht die ganze Substanz der rothen Blutkörperchen in diesen Fällen für Calciumionen impermeabel gewesen sein. Wir haben also ein Beispiel davon, dass eine lebende animale Membran Impermeabilität für eine gewisse Art von Ionen und, zu weiterer Gewissheit, gerade dieselbe Ionenart zeigen kann, von welcher die Annahme ursprünglich gemacht ist.

Die Wahrscheinlichkeit einer solchen Annahme kann also als erwiesen durch Analogien betrachtet werden, und der Verf. hat in derselben den Grund zur Erklärung folgender Beobachtung gesucht. Wenn ein Herz mit einer Salzflüssigkeit gespeist wird, deren Calciumgehalt derselbe ist wie in der für das Froschherz am besten abgepassten Blutmischung, die man hat (1 Theil Rinderblut und 2 Theile 0·7 proc. NaCl-Lösung), so tritt, wie vorher betont, früher oder später ein Stadium ein, wo die Energie des Herzens abnimmt. Wenn die Arbeit nichts destoweniger fortgehen darf, bis die absolute Capacitätsverän-

[1] Vgl. z. B. die von Bunge ausgeführte, in O. Hammarsten, *Lehrb. der physiologischen Chemie.* 3. Aufl. S. 145 citirte Analyse.



derung bei den Pulsschlägen auf $^1/_3$ bis $^1/_4$ der ursprünglichen reducirt worden ist, so kann man dadurch, dass man den Calciumgehalt in geeignetem Grade (z. B. von 0·0065 Proc. auf 0·01 Proc.) erhöht, auch die Excursionsweite beim Herzen vergrössern (vgl. Fig. 6), so dass zuweilen optimale Pulsschläge wiederkehren und in jedem Falle ein bestimmtes Resultat von der Vermehrung der Calciummenge in Form von gesteigerter Arbeitsfähigkeit während nahezu einer Stunde zu Tage tritt. Das Versuchsresultat schliesst allerdings nicht aus, dass Ca auf

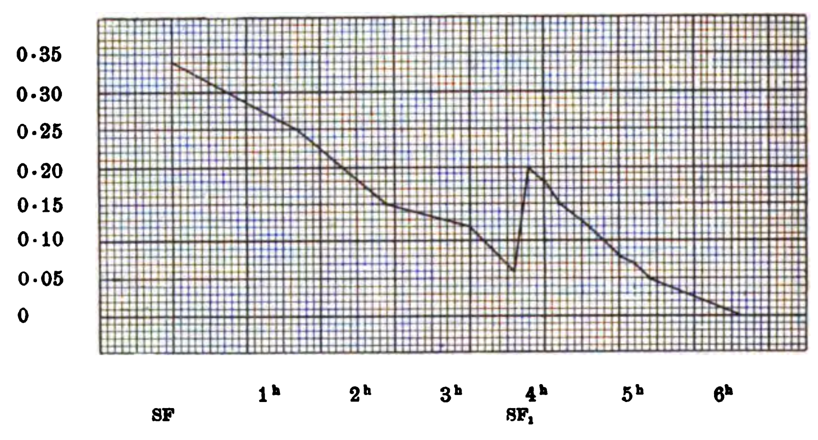


Fig. 6. Die Curve markirt die Wechselungen der Pulsschläge während eines Experimentes, wenn das Herz zuerst (SF) mit einer Flüssigkeit, enthaltend 0·65 Proc. NaCl, 0·1 Proc. $NaHCO_3$, 0·01 Proc. KCl, 0·0065 $CaCl_2$ gespeist wurde; später (SF_1) mit einer neuen Flüssigkeit, enthaltend weitere 0·0035 Proc. $CaCl_2$.

die Stärke der Contraction dadurch einwirkt, dass es z. B. im Contractionsaugenblicke zum Theil eine chemische Combination eingeht, es scheint aber bestimmt auszuschliessen, dass diese Wirkung in solchem Falle die einzige ist. Denn unter der Voraussetzung, dass dies der Fall wäre, gäbe es keinen Grund, weshalb eine, nach den Blutversuchen zu urtheilen, völlig hinreichende Calciummenge nicht während des ganzen Verlaufes des Versuches hinreichend bleiben sollte, da das für die Combination bestimmte Material wahrscheinlich allmählich verzehrt werden muss, möglicher Weise quantitativ unverändert bleiben, aber nicht an Menge zunehmen kann. Unter solchen Verhältnissen kann die Rolle des Ca-Salzes sich nicht darauf beschränken, die mechanische Transformation einer an den Kraftherden entwickelten chemischen Energie zu ermöglichen, sondern muss vielmehr darin bestehen, durch ihre Anwesenheit die Entstehung selbst aus dem Impulse

von der katabolisch wirksamen Reizung zu sichern und deren Stärke im Verhältniss zum Reizmittel zu bestimmen. Dann findet man es erklärlich, dass bei gleichförmiger Reizung[1] ein an spannkrafthaltigem Material nahezu entblösster Muskel ohne Zufuhr von neuer Spannkraft, nur durch Vermehrung der Ca-Menge für eine begrenzte Zeit seine Kraft wieder erhalten kann.

d) Phosphorsäure.

Betreffend das einzige noch übrige Salz, das Phosphat, hat nur beobachtet werden können, dass dessen Anwesenheit in der Regel die Arbeit des Herzens mit sonst geeignet abgepasster Salzlösung um etwas verlängert. Hinzuzufügen ist noch, dass die Phosphatmenge mit der peinlichsten Genauigkeit gewählt worden ist, nur um ja gleichartige und vergleichbare Verhältnisse mit denen in der Blutmischung zu garantiren, und dass diese innerhalb recht weiter Grenzen anders gewählt werden kann, sofern man es nur vermeidet, das Verhältniss zwischen Di- und Monophosphat zu stören.

C. Ueber die Viscosität des Blutes, die rothen Blutkörperchen und das Hämoglobin.

Trotzdem das Herz, wie bereits eine Menge Experimente gezeigt haben, mit einer Lösung von Serumsalzen eine recht bedeutende mechanische Arbeit ausführt, sind doch die Resultate, welche mit Blutmischung erhalten werden, so unverhältnissmässig überlegen, dass man den Unterschied nicht ohne die Annahme erklären kann, dass das Blut durch andere Eigenschaften als die günstige Vertheilung seiner Salze auf die Herzarbeit influirt.

Albanese (16) hat glaubhaft machen wollen, dass die Ueberlegenheit der Blutmischung nicht von einem Gehalt an assimilablen Substanzen, sondern von deren Viscosität und Reichthum an Sauerstoff, also von Eigenschaften herrühren soll, deren Einfluss man experimentell prüfen kann, ohne zum Blut zu greifen. Indess ist die Viscosität, welche ohne Zweifel zu einem verstärkten und verlängerten Arbeitsresultat beitragen kann, von Albanese in einer Weise zum Hauptmoment gemacht worden, welche die Gefahr vor Missverständ-

[1] Das Experiment kann mit demselben Resultat an einer abgeschnürten Herzspitze ausgeführt werden, obgleich die Dauer des Effectes in diesem Falle nicht näher untersucht worden ist.

nissen zu gross macht. Die alkalische Gummilösung, mit der seine Experimente gemacht wurden, erhält wie die mit Gelatine versetzte Serumsalzflüssigkeit die Herzarbeit während eines längeren Zeitraumes. Hierbei aber muss man in Betracht ziehen, dass die Gummilösung, wie Locke (17) angedeutet, ausser dem hinzugesetzten Kochsalze und Alkali gerade die für die Herzthätigkeit noch erforderlichen Calcium- und Kaliumsalze enthält, wie dass deren colloide Beschaffenheit der Entfernung des Gewebesaftes ein solches Hinderniss in den Weg legt, dass der Ausspülungsact wesentlich verlängert wird. Am besten wird der Sachverhalt vielleicht dadurch beleuchtet, dass in dem oben (S. 10) wiedergegebenen Experimente mit Gelatinesalzlösung die Flüssigkeit, welche während der Arbeit in einigen Tropfen langsam durch die Herzwand sickerte, noch 19 Stunden nach Beginn des Versuches auf Heller's Eiweissprobe reagirte, obgleich die circulirende Flüssigkeit diese Reaction nicht gab. Ist also ein noch längerer Zeitraum nöthig, um durch Diffusion den Gewebesaft zu entfernen, und bleibt, wie wir vorher wahrscheinlich gemacht, nach dessen Entfernung in der Muskelzelle ein Vorrath an Spannkraft, so berechtigen die günstigen Resultate mit viscosen Lösungen kaum zu einem anderen Schluss, als dass die Wirkung ihrer Viscosität eine passiv bewahrende, nicht eine activ regenerirende ist. Allein bei einer Untersuchung der Bedingungen für die Herzarbeit muss man principiell unterscheiden zwischen einer Arbeit, welche das Herz mit Benutzung eigener Kraftquellen ausführt, und einer Arbeit, welche dem Herzen durch Einführung bekannter Faktoren abgewonnen werden kann, wenn die eigenen Mittel der Musculatur im Stiche lassen. Es sind hauptsächlich experimentelle Versuche nach dem letztgenannten Verfahren, von welchen bindende Schlüsse zu erwarten sind, und bei aller Anerkennung der Verwendbarkeit der viscosen Lösungen zu Circulationsversuchen müssen wir hier vor jeder anderen Erörterung über die Rolle der Viscosität abstehen, weil sie uns so wenig über die Natur und den Verlauf der mit der Herzarbeit verbundenen chemischen Processe aufklärt.

Von grösserem Interesse ist, dass Blut im Gegensatz zu den colloiden Lösungen die Fähigkeit zu einer regenerativen Thätigkeit zu besitzen scheint, so dass das Herz, nachdem es mit einer der Blutmischung entsprechenden Salzflüssigkeit bis zur überhandnehmenden Kraftlosigkeit gearbeitet hat, von der Blutmischung selbst wieder arbeitsfähig gemacht wird. Wenn für eine unkritische Untersuchung unter gewissen Voraussetzungen ein ähnliches Resultat von der Gelatinelösung gewonnen wird, so sind hierbei sowohl die Ursache wie der Verlauf anderer Art. Es geschieht gar zu leicht, wenn die Gelatine

nur mit einer neutralen Flüssigkeit ausgewaschen wird, dass eine Quantität Calcium zurückbleibt, und dass das Herz durch gesteigerte Excursionen auf eine mit dem Gelatinezusatze eintretende Vermehrung der Calciummenge reagirt. Die Dauer dieser Recreation ist indessen sehr begrenzt. Hinsichtlich der Blutmischung ist, als Folge des Versuchsplanes, einer Wirkung durch vermehrte Calciummenge vorgebeugt, und wahrscheinlich die Vortheile der etwaigen neuen Gruppirung der anderen Salze auf ein Minimum reducirt, aber dennoch tritt eine Recreation ein, welche ausserdem von vielfach grösserer Dauer ist; alles Umstände, welche anzudeuten scheinen, dass der überlebende Muskel eine begrenzte Fähigkeit hat, neues Kraftmaterial aus dem Blute wieder zu bilden.

Es ist eine schwierige Aufgabe, den möglichen Antheil der Formelemente an dieser Wirkung festzustellen, um so mehr, da man im Allgemeinen wenig von ihrer Theilnahme an den nutritiven Processen der Gewebe kennt. Indessen hat Heffter (14) die intacten rothen Blutkörperchen als für die Activität des überlebenden Herzens nothwendig bezeichnet. Als Stütze hierfür beruft er sich darauf, dass lackfarbenes Blut und Serum sich nicht in demselben Grade wie das defibrinirte, aber sonst unveränderte Blut fähig gezeigt haben, die Kraft des Herzens zu erhalten. In der That kann man sich ohne Schwierigkeit davon überzeugen, dass das lackfarbene Blut, welches man durch Aufthauen bei 15 ° C. von fest gefrorenem, frischem Rinderblut erhält, bei normaler Verdünnung, d. h. mit zwei Theilen 0·7 proc. NaCl-Lösung, nicht die Herzarbeit aufrecht zu erhalten vermag.

Doch folgt hieraus nicht, dass das normale Blut durch seine intacten Blutkörperchen wirkt. Bei der Hämolyse haben nicht nur die rothen Formelemente ihre Integrität verloren und ihre Reste sich mit der Serumlösung vermischt, sondern das über die ganze Flüssigkeit vertheilte Hämoglobin scheint auch die im Serum befindlichen, ursprünglich gelösten Calciumsalze gebunden zu haben, und hierin liegt in der That die Ursache der Schwächung der Herzarbeit. Durch Entfernung der Ursache, d. h. durch Hinzufügung von einer genügenden Menge Calciumsalze[1] zu dem verdünnten, hämolytischen Blute, erhält man nämlich eine Flüssigkeit, die sich wie eine normale Blutmischung zum Herzen verhält (vgl. die Figg. 7 und 8). Heffter sprach dem

[1] Eine Mischung von 1 Theil hämolytischen Blutes und 2 Theilen 0·7 proc. NaCl-Lösung wurde in dem genannten Experiment mit 0·01 Procent $CaCl_2$ versetzt.

Hämoglobin alle Schuld an dem abweichenden Verhalten des lackfarbenen Blutes aus dem Grunde ab, dass eine mit Hämoglobin gemischte NaCl-Lösung keine direct giftige Wirkung ausübte, oder sich anders als eine reine Kochsalzlösung verhielte. Er übersah aber, weil er die Bedeutung der Calciumsalze nicht kannte oder nicht anerkannte, die Möglichkeit eines indirecten Schadens durch die Gegenwart des ausgelösten Hämoglobins. Ein solcher entsteht jedoch, wenn man, nachdem man ein Herz eine Zeit lang mit Serumsalzflüssigkeit gespeist hat, dieselbe gegen eine neue Quantität austauscht, welche mit einer genügenden Menge Hämoglobin[1] vermischt ist. Bald geben sich dann

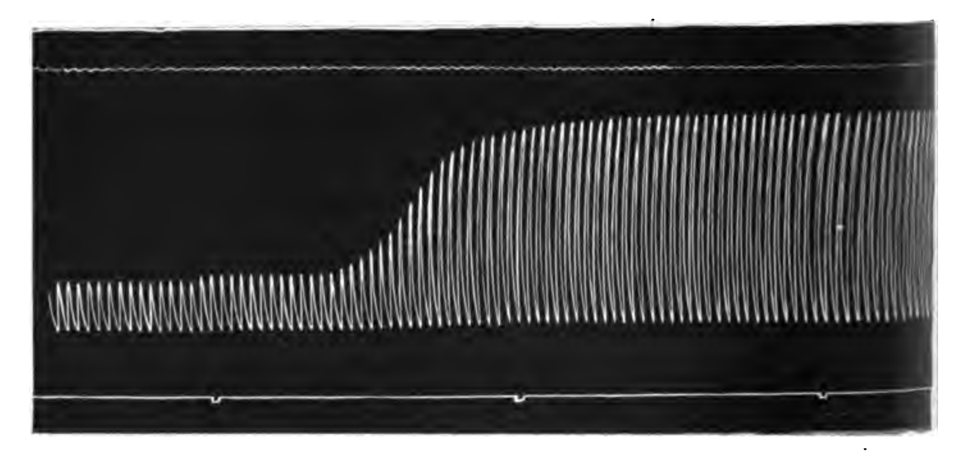


Fig. 7. Manometercurve, aufgezeichnet von einem Herzen nach 40 stünd. Arbeit mit einer Mischung von 1 Theil hämolytischen Blutes und 2 Theilen 0·7 proc. NaCl-Lösung. Bei SF wird anstatt der ersteren Flüssigkeit eine Lösung folgenden Inhalts hineingeleitet: 0·65 Proc. NaCl, 0·1 Proc. $NaHCO^3$, 0·01 Proc. KCl, 0·0065 Proc. $CaCl_2$. Die Curve wird von links nach rechts abgelesen. Die Zeitmarkirung in Minuten.

die typischen Symptome des Calciummangels zu erkennen durch wachsendes Unvermögen zur Systole, überhandnehmende Schlaffheit der Musculatur und Ausspannung des Herzens durch den Druck der Flüssigkeit.

[1] Der Verfasser hat nicht die Gelegenheit gehabt, selbst Hämoglobin darzustellen. Die Präparate verschreiben sich theils aus der Instructionsapotheke Nordstjärnan zu Stockholm, theils von E. Merck, Darmstadt. Für den genannten Zweck war die Reinheit doch weder in dem einen, noch dem anderen Falle genügend. Von den mit Hämoglobinzusatz gemachten Experimenten, welche also mit einer gewissen Reservation aufgenommen werden müssen, ist aus diesem Grunde nichts reproducirt worden.

Das Verhalten des hämolytischen Blutes erscheint uns in vielen Beziehungen bemerkenswerth. Es enthält dieselben Ingredienzen wie normales Blut, hemmt aber dennoch die Herzarbeit aus dem einzigen Grunde, dass das Calcium hier an organische Complexe gebunden ist, während das Herz es in der Form von dissociirtem Elektrolyt nöthig hat. Wir sehen hierin ein neues Kriterium, dass der Muskel freie Ca-Ionen braucht, um die Arbeitskraft und die Irritabilität zu bewahren.

Eine der Möglichkeiten, mit denen Ringer hat rechnen müssen bei der Beurtheilung der Calciumwirkungen, nämlich die, dass nur die organischen Nährstoffe die Stärke der Herzarbeit bestimmen, dass Calcium aber eine ihnen ähnliche exitirende Wirkung ausüben kann, erscheint uns beseitigt, wenn dargethan ist, dass nicht einmal im

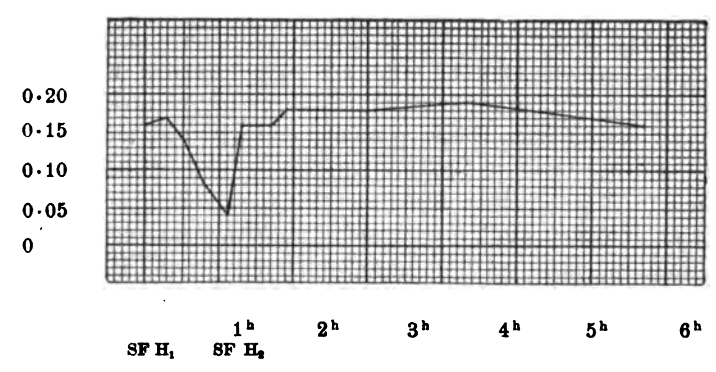


Fig. 8. Skizze der Variationen in Pulsvolumen während eines Versuches, wo das Herz gespeist wurde mit: 1. einer Lösung von 0·65 Proc. NaCl, 0·1 Proc. $NaHCO_3$, 0·01 Proc. KCl, 0·0065 Proc. $CaCl_2$ (= SF); 2. 1 Theil hämolytischen Blutes gemischt mit 2 Theilen 0·7 proc. NaCl-Lösung (= H_1); 3. = 1. (SF); 4) 1 Theil hämolytischen Blutes und 2 Theile 0·7 proc. NaCl-Lösung und 0·01 proc. $CaCl_2$ (H_2). Geholt von demselben Experiment wie Fig. 7.

Blute die Gegenwart von sämmtlichen Eiweisskörpern bezw. nutriirenden Substanzen hinreichend ist, die Arbeit aufrecht zu erhalten, wenn Calcium nicht in disponibler Form enthalten ist. Beleuchtend ist endlich das angeführte Experiment nicht am geringsten dadurch, dass es davon zeugt, wie fruchtlos es sein muss, die Bedeutung einer organischen Substanz für die Muskelarbeit dadurch zu prüfen, dass man sie in „physiologischer Kochsalzlösung“ löst, ohne den Bedarf der übrigen Salze zu berücksichtigen.

Als weitere Stütze für seine Auffassung betonte Heffter, dass Blutmischung die Kraft des arbeitenden Herzens besser bewahrt als Serum. Sofern diese Angabe sich auf unverdünntes Serum bezieht,

so hat Verf. dieselbe bestätigt gefunden; das Froschherz scheint ein unverändertes Rinderblutserum weniger gut zu vertragen, und zwar unter Anderem in Folge der starken Alkalescenz desselben. In solchen Fällen aber wird das Resultat besser, wenn man mit NaCl-Lösung verdünnt. Verdünnung von Rinderblutserum wie von Rinderblut ist deshalb zu empfehlen und, wie bereits McGuire's Versuche ergaben, weniger als eine Sparsamkeitsmaassregel, als wie ein Erfüllen gewisser Anforderungen von Seiten des Muskels zu betrachten. Heffter's ungünstige Resultate, welche sich von den meinigen auch in den Fällen unterschieden, wo Verdünnung vorlag, können ihre Ursache in accidentellen schädlichen Eigenschaften bei der angewandten Serumflüssigkeit oder in ungenügender Ventilation haben. Er setzte nämlich voraus, dass die Respiration des Herzens ausschliesslich durch Vermittelung der circulirenden Flüssigkeit — nicht, wie bei Anordnung des Verf. durch Ventilation in Gasmischung — geschehen soll, und unter solchen Verhältnissen kann es nicht mit Fug bezweifelt werden, dass die Blutmischung der Serummischung überlegen ist, und zwar in Folge Anwesenheit der intacten Blutkörperchen. Andererseits aber darf man nicht übersehen, dass die Blutmischung z. B. einer Salzlösung auch durch andere Eigenschaften als ihren Blutkörperchen überlegen ist. Wenn aber Heffter als seine Ansicht ausgesprochen hat, dass die rothen Blutkörperchen die wichtigsten Faktoren für die Herzthätigkeit bilden, findet er dieselbe nicht ohne Grund gegen die Resultate anderer Forscher streitend. Es zeigt sich nämlich, dass die Arbeit der durch Salzdiät verarmten Musculatur nicht nur von Blutmischung verstärkt wird, sondern auch von Serummischung (1 Theil Serum und 3 Theile 0·7 proc. NaCl-Lösung) (vgl. Fig. 4), und zwar in einer Weise, welche bei Anwendung eines geeigneten Gasmediums von der der Blutmischung nicht nachweisbar abzuweichen scheint.

D. Ueber die Bedeutung der organischen Substanzen des Serums.

Wenn also die Serummischung in einem gewissen Grade die mechanische Kraft des Herzens wieder herstellt, nachdem es mit einer Lösung der Serumsalze bis zur Ermattung gearbeitet hat, so muss das Serum eine organische Substanz enthalten, durch deren Betheiligung am Stoffwechsel ein verbessertes Arbeitsresultat erreicht wird. Wir werden dann vor die keineswegs leicht zu lösende Aufgabe gestellt, den Körper zu isoliren, dessen Verbrennung im vorliegenden Falle eine Quelle von Muskelkraft ist. Einzelne Versuche sind zu ähnlichem Zwecke früher gemacht worden. Hierher seien

Stienon's (3) Beobachtungen über die „fibrinoplastische Substanz“ gezählt. Andere Forscher haben sich damit begnügt, gereinigte Präparate von Substanzen zu prüfen, die nach seiner Zeit herrschenden Anschauungen im Serum hätten vorkommen müssen. So studirte Gaule (4) den Einfluss des Peptons auf die Herzarbeit, Martius (6) die des Peptons und Glykogens und Locke (16) die des Traubenzuckers. Gaule und Locke glaubten beide zu positivem, Stienon und Martius zu negativem Resultate gekommen zu sein.

In älteren Arbeiten gilt Folgendes als Kriterium für die Verwendbarkeit eines Stoffes zu Muskelarbeit. Wenn die Substanz in einer zweckmässig alkalisirten Kochsalzlösung gelöst wird, soll sie die Herzarbeit wieder beleben, wenn diese aufzuhören droht in Folge der fortgehenden Behandlung des Herzens mit ausschliesslich alkalisirter Kochsalzlösung. Indess ist niemals dargethan worden, dass eine einheitliche organische Substanz existirt, welche diese Forderung erfüllt. In letzterer Zeit hat White (18) ausgesprochen, dass einer Flüssigkeit nutritive Eigenschaften erst dann zuzusprechen seien, wenn sie das Herz zu activiren vermag, nachdem es nach Behandlung abwechselnd mit Ringer's Lösung und physiologischer Kochsalzlösung aufgehört hat, auf die stärksten Reizmittel zu reagiren. White zeigte, dass diese Ansprüche vom Blute erfüllt werden. Indess ist dies Verfahren durchaus nicht unantastbar, denn theils ist die Forderung auf alternirende Behandlung mit zwei verschiedenen Salzflüssigkeiten eine ganz willkürliche, theils erhält man keine überzeugenden Garantien dafür, dass es die nutriirenden Eigenschaften der Flüssigkeit sind, durch welche die Function wieder hergestellt wird; der höhere Calciumgehalt und die grössere Alkalescenz des Blutes können, von anderen Eigenschaften nicht zu reden, dabei wirksam sein.

Da es ausserhalb des Rahmens dieser Arbeit liegt, andere organische Substanzen als solche zu untersuchen, welche aus Serum isolirt worden sind oder isolirt werden können, setzen wir nur voraus, dass, wenn eine von ihnen Nährwerth für die Muskelzelle besitzt, deren Lösung in der Serumflüssigkeit nahezu dieselbe Ueberlegenheit über das unorganische Lösungsmittel besitzen soll wie die Serummischung selbst. Um den Einfluss der verschiedenen Isolationsproducte zu beurtheilen, hat Verf. das Herz erst mit Serumsalzflüssigkeit so lange arbeiten lassen, dass das Pulsvolumen auf $^1/_2$ bis $^1/_4$ des ursprünglichen sinkt, wonach eine mit derselben Flüssigkeit bereitete Lösung der zu prüfenden Substanz hineingeleitet worden ist. Folgt dann eine lange — 10 Stunden oder mehr — dauernde Steigerung der Arbeitskraft, die nicht erklärt werden kann z. B. nur durch Umplacirung

des Alkalis oder unfreiwillige Vermehrung des Calciums bei Einführung eines als Säure wirkenden calciumhaltigen Eiweisskörpers, so muss sie in der Eigenschaft der organischen Substanz begründet sein, sich zu assimiliren und den Herzmuskel mit Material für neue Arbeitzu versehen.

a) Glycose.

Die erste Untersuchung galt der Glykose, welche in reiner Form in der Salzflüssigkeit in einer Menge von 0·05 bis 0·1 Proc. aufgelöst wurde. Indess wurde bei der Einführung dieser Substanz kein mit der Wirkung von Serummischung vergleichbares oder auch nur merkbares Resultat verspürt. Locke's Experimente, welche für eine Verwerthung der ungebundenen Glykose sprachen, erhalten also keine Bestätigung durch Versuche nach der hier angewandten Methode.

b) Serumalbumin.

Grössere Erwartungen hatte man vom Serumalbumin, weil die allgemein anerkannten nutritiven Flüssigkeiten (Blut, Serum, Lymphe, Milch) die gemeinsame Eigenschaft haben, bei chemischer Analyse Serumalbumin als eines ihrer quantitativ wichtigsten Producte zu geben. Ausser diesem Wahrscheinlichkeitsgrunde liegt indess kein Beweis vor, dass das Serumalbumin bei der Arbeit des Herzmuskels die Kraftquelle bildet. Ohne Weiteres diese Ansicht geltend zu machen, wäre unklug, da die animalen Nutritionsflüssigkeiten ja andere Eiweisskörper, wie auch Repräsentanten für andere Gruppen organischer Verbindungen enthalten. Es schien also von einem gewissen Interesse zu sein zu erforschen, in welchem Maasse das nach modernen chemischen Methoden isolirte Serumalbumin die Erwartungen erfüllt, die man in Bezug auf dasselbe ausgesprochen hat.

Serumalbumin wurde zuerst nach Johansson's[1] Methode dargestellt. Serum wurde bei 30° C. mit $MgSO_4$ bis zur Sättigung gefällt. Das Filtrat wurde mit Essigsäure zu 1 Proc. versetzt. Nach neuer Filterung wurde die Fällung mit Zusatz von NaOH zu neutraler Reaction in destillirtem Wasser gelöst; die Lösung wurde dialysirt, bis der Inhalt der Dialysatoren nur eine mit Mühe unterscheidbare Reaction auf $BaCl_2$-Zusatz gab. So gereinigtes Serumalbumin (Serumalbumin *a*), entsprechend 250 ccm Serum, wurde unter Zusatz der gewöhnlichen Serumsalze durch Verdünnung mit destillirtem Wasser zu einem Liter Volumen gebracht, so dass die Flüssigkeit, unter der Voraussetzung der quantitativen Herausfällung des Serumalbumins, Serum-

[1] Nach O. Hammarsten, *Lehrbuch der physiol. Chemie.* 3. Aufl. S. 106 cit.



albumin in derselben Menge enthielt wie ein mit 3 Theilen physiologischer Kochsalzlösung verdünntes Serum.

In allen mit dieser Flüssigkeit angestellten Versuchen trat nun das eigenthümliche Verhältniss ein, dass nach dem Albuminzusatz die Arbeit herunterging, anstatt zu steigen. Hierzu erschien kaum ein anderer Erklärungsgrund möglich als der, dass das mit Säure behandelte Serumalbumin einen Theil Ca-Radikale in der Salzflüssigkeit bindet, und auf diese Weise indirect, ebenso wie der Zusatz von freiem Hämoglobin, Symptome von Calciummangel bringt. Um die Möglichkeit dieser Fehlerquelle auszuschliessen, wurde das Verfahren dahin geändert, dass der Inhalt im Dialysator gegen Ende der Dialyse mit $CaCl_2$ zu 0·0065 Proc. versetzt wurde, wonach die Dialyse einige Zeit gegen destillirtes Wasser von demselben $CaCl_2$-Gehalt fortgehen durfte. Serumalbumin von der neuen Bereitung (Serumalbumin *b*) wurde dann auf dieselbe Weise wie das vorige geprüft. In Fig. 9 ist der Verlauf

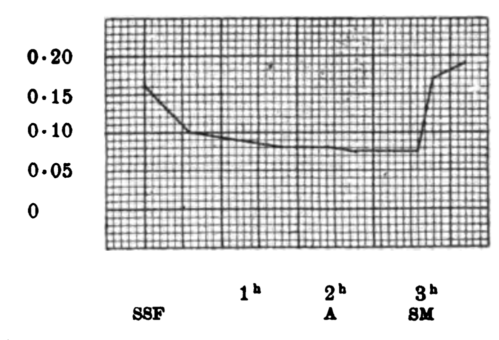


Fig. 9. Die Curve giebt die Veränderungen in der Pulsweite bei einem Herzen unter abwechselnder Arbeit mit 1. Serumsalzflüssigkeit (SSF) nach der Formel S. 9 wieder; 2. derselben Flüssigkeit, versetzt mit Serumalbumin *b* in einer Menge, entsprechend $^1/_4$ von derjenigen, welche aus Serum erhalten wird (A); 3. Serummischung (SM).

eines solchen Experimentes graphisch wiedergegeben. Eine schädliche Wirkung des Albuminzusatzes erscheint jetzt nicht mehr. Andererseits aber kam in dem citirten und in noch einem Experiment (Fig. 10 S. 46) auch keine Veränderung zum Besseren vor. In einem dritten Falle (Exp. 27./II.) wurde eine sowohl nach Zeit als Umfang ziemlich begrenzte Arbeitssteigerung beobachtet.

Experiment d. 27./II. 1899. Serumsalzflüssigkeit. Atmosphäre: Luft.

Zeit	Pulsvolumen in Cub.-Cent.
2^h 40′	0·29
4^h	0·26
5^h	0·235

Zeit	Pulsvolumen in Cub.-Cent.
6^h	0·215
7^h	0·185
8^h	0·135
8^h 50′	0·05
8^h 52′ wurde eine Lösung von Albumin *b* in die Serumsalzflüssigkeit geleitet.	
9^h	0·06
9^h 20′	0·09
9^h 40′	0·095
10^h	0·10
10^h 20′	0·09
10^h 40′	0·08
11^h	0·065
11^h 50′	0·05

Obgleich der Zusatz von Serumalbumin hier von einer augenscheinlichen Arbeitssteigerung begleitet wird, ist diese doch allzu vorübergehend, um der Restitution durch Serummischung zur Seite gestellt werden zu können und zu der Ansicht zu berechtigen, dass das Serumalbumin in den Vorrath des Muskels an disponibler Spannkraft eingeht. Möglicher Weise ist die Veränderung in der Alkalescenz eine beitragende Ursache zu dem günstigen Resultate, und wird dieses durch den viscosen Charakter des Albumins verlängert.

Serumalbumin wurde zur Controle auch nach Starke's[1] Methode erzeugt, die keine Säurebehandlung erfordert. Serum wurde mit $MgSO_4$ zur Sättigung bei 30° C. gefällt. Das Filtrat wurde mit Na_2SO_4 bei 40° gesättigt. Nach neuer Filtrirung ward die Fällung in Wasser gelöst und die Lösung der Dialyse unterworfen, bis sie mit $BaCl_2$-Lösung nur eine schwache Andeutung von Reaktion gab. Von so dargestelltem Serumalbumin (Serumalbumin *c*) wurde eine Lösung geprüft, deren Albumingehalt $^1/_8$ von dem im Serum entsprach.

Experiment d. 1./V. 1899. Serumsalzflüssigkeit. Atmosphäre: Luft.

Zeit	Pulsvolumen in Cub.-Cent.
1^h 15′	0·11
1^h 55′	0·14
3^h 4′	0·14
4^h 10′	0·11
4^h 30′	0·07
4^h 33′ Serumsalzflüssigkeit, versetzt mit Serumalbumin *c*.	
5^h	0·05
6^h 14′	0·05
8^h 35′	0·04

[1] Nach O. Hammarsten, *Lehrbuch der physiologischen Chemie.* 3. Aufl. S. 107 citirt.

Eine Veränderung der Arbeit in Folge des Albuminzusatzes scheint in diesem Falle kaum stattgefunden zu haben.

In keinem der angeführten Experimente hat von der Lösung des chemisch isolirten Serumalbumins in einem sonst für die Arbeit günstigen unorganischen Menstrum eine Wirkung erhalten werden können wie von der Mutterflüssigkeit, aus welcher das Serumalbumin dargestellt worden ist. Sofern man unter dem letzteren die durch analytische Methoden gewonnene Substanz unter diesem Namen versteht, muss es als übereilt bezeichnet werden, das Serumalbumin als das wirksame Princip in den zusammengesetzten Flüssigkeiten zu betrachten, welche die Fähigkeit gezeigt haben, die Herzarbeit zu unterhalten. Wenn also v. Ott (9) auf diese unhaltbare Annahme eine Methode gegründet hat, Serumalbumin nachzuweisen, und mit dieser Methode eine schon im Magen- und Darminhalt erfolgende Synthese von Pepton zu Serumalbumin nachgewiesen zu haben meint, so fehlt in seinen Experimenten der wirkliche Grund für die Beweiskraft, welche er denselben hat beilegen wollen.

c) Paraglobulin.

Abgesehen von Stienon's früher erwähnter Prüfung der fibrinoplastischen Substanz, scheint die zweite Gruppe von Eiweisskörpern im Serum — das Paraglobulin — nicht zum Gegenstande für Nutritionsuntersuchungen am Froschherzen gemacht worden zu sein. Obgleich sie in sich recht heterogene Körper enthalten dürfte, repräsentirt sie doch eine durch chemische Charaktere vom Albumin gut abgegrenzte Gruppe und scheint aus diesem Grunde eine ähnliche Prüfung wie das Albumin zu verdienen. In Folge reichlicherer Ausbeute wurde Pferdeserum als Material für die Darstellung verwandt. Das Paraglobulin wurde nach folgenden allgemeinen Vorschriften isolirt.[1] Nach Neutralisation mit Essigsäure wurde Serum mit dem 12 fachen Volumen Wasser verdünnt. Der abdecantirte und abfiltrirte Bodensatz wurde in einer geringen Menge 1 proc. NaCl-Lösung gelöst, wonach das Globulin wieder durch Verdünnung mit einem vielfachen Volumen Aqua dest. ausgefällt wurde. Die neue, abfiltrirte und ausgepresste Fällung wurde in Serumsalzflüssigkeit gelöst, sodass auf 1 Liter derselben die Fällung von 250 ccm Serum kam. In Fig. 10 wird die Wirkung des durch zwei Fällungen gereinigten Paraglobulins, nachdem vorher Serum-

---

[1] Vgl. O. Hammarsten, *Lehrbuch der physiologischen Chemie.* 3. Aufl. S. 105.

albumin *b* ohne sichtliches Resultat versucht worden war, anschaulich gemacht.

Die Curve zeigt nach der Globulinzufuhr eine rasche Steigerung des Pulsvolumens, welches etwa 20 Minuten nach dem Flüssigkeitswechsel culminirt und dann eine Höhe, entsprechend der bei Beginn des Versuches erreicht. Das Volumen fängt nun an, mit etwas geringerer Schnelligkeit zurückzugehen, und befindet sich nach Verlauf von ungefähr einer Stunde auf demselben Niveau wie unmittelbar vor dem Umtausch. Der ganze Verlauf erinnert offenbar an den, den wir einer mässigen Vermehrung der Calciummenge haben folgen sehen, wenn das Herz lange mit einer physiologischen Salzflüssigkeit gearbeitet hatte (vgl. Fig. 6 S. 34). Dass auch Calciumsalze mit der Fällung folgen, dürfte als entschieden zu betrachten sein. Doch ist kaum anzunehmen, dass

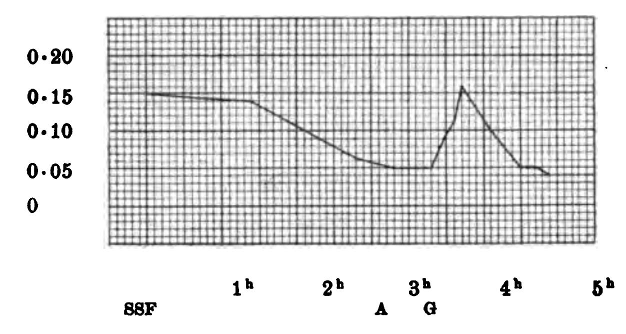


Fig. 10. Die Curve markirt die während des Verlaufes eines Experimentes fortschreitenden Pulsveränderungen bei der Arbeit mit 1. Serumsalzflüssigkeit (SSF) nach der Formel S. 9; 2. derselben Flüssigkeit, versetzt mit Serumalbumin *b* zu einer Menge, entsprechend $^1/_4$ der aus einer ebenso grossen Serumquantität erhaltenen (A); 3. einer Flüssigkeit, entstanden durch Lösung der Paraglobulinfällung von 250 ^{ccm} Serum in 1 Liter der Flüssigkeit unter 1. (G).

dies in einer Ausdehnung geschieht, welche hinreichend ist, das gewonnene Resultat allein zu erklären. Welche auch die beitragenden Faktoren sind, so scheint die Reaction allzu schnell vorübergehend zu sein, um von einer durchgreifenden Veränderung im Stoffwechsel wie bei Zufuhr von Serummischung zu zeugen.

Zu derselben Auffassung führten Controlversuche mit einem auf anderem Wege dargestellten Paraglobulin. Serum wurde mit $MgSO_4$ bei 30° C. gesättigt. Die Fällung wurde auf den Filter genommen, mit gesättigter $MgSO_4$-Lösung gewaschen und in einer gesättigten Lösung von Na_2SO_4[1] vertheilt. Die so gereinigte und dann abfiltrirte

[1] Die Behandlung mit Na_2SO_4 sollte die Dialyse erleichtern und die Er-

Fällung wurde in Wasser gelöst, und die Lösung der Dialyse unterworfen. Von dem Producte aus der Dialyse nebst den erforderlichen Serumsalzen wurde eine Flüssigkeit bereitet, welche Paraglobulin enthielt, entsprechend $^1/_8$ der Menge im Serum. Ein angestellter Versuch zeigt folgende Beträge:

Experiment d. 15./V. 1899. Serumsalzflüssigkeit. Atmosphäre: Luft.

Zeit	Pulsvolumen in Cub.-Cent.
4h 15′	0·28
6h 22′	0·065
6h 27′	wurde die Paraglobulinlösung hineingeleitet.
6h 35′	0·105
6h 50′	0·100
7h 30′	0·088
8h 20′	0·045

Was, wie wir vorher gesehen, vom Traubenzucker und Serumalbumin gilt, scheint auch in Bezug auf das Paraglobulin seine Gültigkeit zu haben. Die isolirte und chemisch gereinigte Substanz wird in diesem Zustande für die Herzarbeit nicht verwerthet. In einem solchen Resultat braucht an und für sich aber nichts Befremdendes zu liegen. In der That zwingt uns nichts anzunehmen, dass die zu einem gewissen Grade conventionellen Producte der chemischen Analyse zugleich nutritive Einheiten sind; sie können mit ebenso grosser Wahrscheinlichkeit Spaltungsproducte höherer Systeme sein, welche in dem hier vorliegenden Falle nur in ihrer vollendeten Form in den Verbrennungsact hineingerückt werden können. Ein Umstand, welcher die letzte Alternative wahrscheinlich zu machen scheint, kam durch einen Zufall an den Tag. Wenn der übliche Reinigungsprocess bei der Bereitung des Paraglobulins nach der ersten Methode unterlassen und die primäre, abfiltrirte und ausgepresste Fällung nur von wasserlöslichen Verunreinigungen durch wiederholte Vertheilung in destillirtem Wasser und Wiedergewinnung mittels Sedimentirung und Filtrirung befreit wird, erhält man im Präparat, dessen Lösung mit Serumsalzen der Serummischung sich so ähnlich verhält, dass es unsere Aufmerksamkeit ganz besonders verdient. Beleuchtend für dessen Verhalten ist beigefügtes Experiment.

---

zeugung möglichst übereinstimmend mit der Starke'schen Methode für Isolirung des Serumalbumines machen.

Experiment d. 7./V. 1899. Serumsalzflüssigkeit. Atmosphäre: Luft.

	Zeit	Pulsvolumen in Cub.-Cent.
	2^h 45′	0·155
	4^h 10′	0·085
	4^h 12′	wurde eine in Wasser gereinigte Globulinfällung von $^1/_2$ Liter Serum, gelöst in einem Liter Serumsalzflüssigkeit, hineingeleitet.
	4^h 17′	0·185
	4^h 27′	0·150
	4^h 37′	0·145
	4^h 47′	0·130
	4^h 57′	0·130
	7^h 30′	0·155
	8^h 15′	0·145
	10^h	0·135
	11^h 15′	0·130
8./V.	8^h 50′	0·107
	10^h 25′	0·09

Die Kammercontractionen sind noch gegen Ende kräftig, werden aber immer seltener, bald gruppirt, bald einzeln; mit anderen Worten die Herzarbeit hört unter denselben Erscheinungen auf, welche die gewöhnlichen sind, wenn das Absterben bei ungestörter Nahrungs- und Sauerstoffzufuhr (Blutmischung, Serummischung) geschieht: der Ventrikel hört auf zu arbeiten, entweder weil die normalen Reizungen ausbleiben, oder die Musculatur unter die Reizungsschwelle für die im Herzen befindlichen Impulse sinkt, bevor dessen Kraft erschöpft ist, denn bei mechanischer Reizung führt die Kammer noch eine Zeit lang wirksame Contractionen aus.

Augenfällig ist es, dass das Pulsvolumen noch 18 Stunden nach Einführung der neuen Flüssigkeit grösser ist als unmittelbar vor dem Wechsel. Dasselbe zeigt während des Verlaufes zwei Maxima, das eine 15 Minuten nach der Flüssigkeitsveränderung, das zweite 3 Stunden später. In dem ersten erkennen wir die Uebereinstimmung mit dem spitzen Gipfel bei der Curve nach Zusatz von chemisch gereinigtem Paraglobulin (Fig. 10). Die erste, schnell eintretende Reaction dürfte unter Anderem an unvermeidliche Veränderungen im Calciumgehalte der Flüssigkeit und in der Vertheilung von dessen Alkali gebunden sein. Die letztere Steigerung ist dagegen mit grösster Wahrscheinlichkeit ein Kriterium davon, dass eine langsame Assimilation von organischem Material stattgefunden hat und von einer lebhafteren Dissimilation unter Steigerung der ausgeführten Arbeit begleitet wird.

Zur Beurtheilung der chemischen Natur des assimilirten Stoffes giebt uns die Darstellungsweise einen obwohl ungenügenden Anhalte-

punkt. Dass die abweichenden Eigenschaften des „unreinen“ Paraglobulins mit einer ursprünglicheren Form für dessen Vorkommen im Zusammenhang steht, scheint anzunehmen zu sein. Am nächsten dürfte eine Vermuthung liegen, dass das Paraglobulin ursprünglich und auch in der mittels Wasser gereinigten Fällung sich zum Theil in einer lockeren Bindung mit Lecithin befindet, welche zerrissen wird, wenn die Reinigung unter wiederholter Ausfällung aus einer Lösung in Salzwasser vorgenommen wird. Ganz abgesehen von dem hier dargestellten Unterschiede in der physiologischen Reaction ist auch eine in der Sache ähnliche Auffassung von der Weise, wie das Paraglobulin im Serum vorkommt, von anderer Seite[1] ausgesprochen worden.

Wenn es aber auch nachgewiesen werden könnte, dass das ausfällbare Product eine Lecithinverbindung des Paraglobulins wäre, muss es doch trotz der Auskünfte, welche das Experiment uns gegeben, dahingestellt sein, zu welcher organischen Gruppe der wirksame Atomencomplex gehört, denn zu einem Molecül der genannten Art würde zwar in erster Linie ein Eiweisskern gehören, ausserdem eine Kohlehydratgruppe[2] und zwei Fettsäureradikale darin enthalten sein.

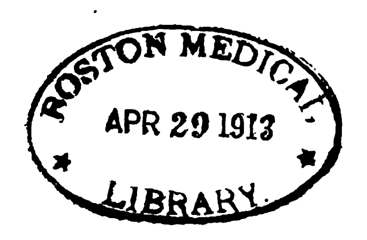
Trotz Entfernung der bei der Verdünnung fallenden Substanz ist die nutritive Kraft des Pferdeserums nicht erschöpft. Das Filtrat ist noch wirksam und enthält also eine andere, vielleicht nur unwesentlich von der ersteren abweichende Substanz, welche indess nicht durch weiter getriebenen Zusatz von Wasser ausgefällt wird und die, nach einem früheren Experiment (15./V. S. 47) zu urtheilen, auch bei Sättigung mit $MgSO_4$ nicht unverändert ausgefällt wird.

Bei Abschluss der Arbeit ist es dem Verfasser eine angenehme Pflicht, Herrn Professor Hj. Oehrwall, welcher die Untersuchung des Verhaltens einiger organischer Stoffe zur Herzarbeit vorgeschlagen und zu diesem Zwecke eigene, für Herzversuche bestimmte Apparate dem Verfasser zur Verfügung gestellt und auch sonst sein Interesse für die Förderung der Arbeit bekundet hat, hiermit seinen wärmsten Dank auszusprechen. Auch Herrn Professor O. Hammarsten ist Verfasser für mehrere praktisch-chemische Rathschläge und Auskünfte zu grossem Danke verpflichtet.

---

[1] Vgl. H. J. Bing, Ueber das Jecorin. *Centralbl. f. Physiol.* Bd. XII. S. 211.

[2] K. A. H. Mörner, Reducirende Substanz aus dem Globulin des Blutserums. *Centralbl. f. Physiol.* Bd. VII. Heft 20.



Litteratur.

1. O. Nasse, Beiträge zur Physiologie der contractilen Substanz. *Archiv f. d. ges. Physiol.* (1869). Bd. II. S. 97.

2. H. Kronecker, Das charakteristische Merkmal der Herzmuskelbewegung. Ludwig's *Festgabe.* (1875). S. 173.

3. Stienon, Die Betheiligung der einzelnen Stoffe des Serums an der Erzeugung des Herzschlages. *Arch. f. Anat. u. Physiol.* Physiol. Abth. (1878). S. 268.

4. J. Gaule, Die Leistungen des entbluteten Froschherzens. Ebendas. (1878). S. 291.

5. Mc Guire, Ueber die Speisung des Froschherzens. Ebendas. (1878). S. 321.

6. Fr. Martius, Die Erschöpfung und Ernährung des Froschherzens. Ebendas. (1882). S. 543.

7. Saltet, Ueber die Ursachen der Ermüdung des Froschherzens. Ebendas. (1882). S. 567.

8. S. Ringer, Concerning the influence exerted by each of the constituents of the blood on the contraction of the ventricle. *Journ. of Physiology.* (1880 bis 1882). Vol. III. p. 380.

9. v. Ott, Ueber die Bildung von Serumalbumin im Magen und über die Fähigkeit der Milch, das Froschherz leistungsfähig zu erhalten. *Archiv f. Anat. u. Physiol.* Physiol. Abth. (1883). S. 1.

10. S. Ringer, Regarding the influence of the organic constituents of blood on the contractility of the ventricle. *Journ. of Physiology.* (1884 bis 1885). Vol. VI. p. 361.

11. O. Langendorff, Studien über Rhythmik und Automatie des Froschherzens. *Archiv f. Anat. u. Physiol.* Physiol. Abth. Suppl.-Bd. (1884) S. 103.

12. Ostwald, Elektrische Eigenschaften halbdurchlässiger Scheidewände. *Zeitschr. f. physik. Chemie.* (1890). Bd. VI. S. 71.

13. S. Ringer, The influence of carbonic acid dissolved in saline solutions on the ventricle of the frogs heart. *Collected Papers IX*, Physiological Laboratory, *University College.* (1892 bis 1894). S. 125.

14. A. Heffter, Ueber die Ernährung des arbeitenden Froschherzens. *Archiv f. experim. Pathol. u. Pharmakol.* (1892). Bd. XXIX. S. 41.

15. G. Tammann, Ueber die Permeabilität von Niederschlagmembranen. *Zeitschr. f. physikal. Chemie.* (1892). Bd. X. S. 255.

16. M. Albanese, Einfluss der Zusammensetzung der Ernährungsflüssigkeit auf die Thätigkeit des Froschherzens. *Archiv für experim. Pathol. und Pharmakol.* (1893). Bd. XXXII. S. 297.

17. F. S. Locke, Towards the ideal artificial circulating fluid for the isolated frog's heart. *Journal of Physiology.* (1895). Vol. XVIII. S. 332.

18. A. White, On the nutrition of the frog's heart. Ebendas. (1895 bis 1896). Vol. XIX. S. 344.

19. Hj. Oehrwall, Erstickung und Wiedererweckung des isolirten Froschherzens. *Dies Archiv.* (1897). Bd. VII. S. 222.

20. C. W. Greene, On the relation of the inorganic salts of blood to the automatic activity of a strip of ventricular muscle. *American Journal of Physiol.* (1898). Vol. II. S. 82.

Studien über Muskelwärme.[1]

Von

Magnus Blix.

(Aus dem physiologischen Laboratorium der Universität Lund.)

(Hierzu Taf. I—III.)

Einleitung.

Allgemeines.[2]

Bei den höheren Thieren macht die Musculatur einen ganz wesentlichen Theil von der Körpermasse aus. Ein grosser Theil des Stoffumsatzes wird deshalb auch hier vollzogen. Das stetige Zerfallen und Wiederaufbauen der Molecüle, das mit der Lebensthätigkeit der Zelle verbunden ist und die Intensität dieser Thätigkeit beweist, ist gewiss nicht im Muskel am wenigsten lebhaft. Der Reichthum an Blutgefässen und damit die Fülle der Durchblutung deuten schon an, dass eine schnelle Umsetzung in diesen Organen stattfindet, dass die Zufuhr von Nährstoff, Energie in der Form chemischer Spannkraft, schnell und reichlich vorgeht oder wenigstens vorgehen kann, wie auch die Wegführung der unbrauchbaren Producte der Umsetzung mit entsprechender Geschwindigkeit geschehen kann.

[1] Der Redaction am 28. Mai 1901 zugegangen.

[2] Diese Arbeit ist früher in schwedischer Sprache als Universitätsprogramme von 1899 und 1900 erschienen. Bei Redigirung der deutschen Ausgabe bin ich dem Originale meistens genau gefolgt. Einige Verkürzungen habe ich mir doch gestattet und ein Nachtrag, welcher im Originale nicht zu finden ist, wurde hinzugefügt.

Die chemischen Processe, welche wir aus guten Gründen im Muskel sich abspielend annehmen, haben vor Allem die Aufgabe, den Muskel zu ernähren, denselben in functionstüchtigem Zustande zu erhalten und ihn in diesen Zustand zurück zu bringen, wenn er aus irgend einer Ursache daraus gebracht wurde. Weiter nimmt man aber auch an, dass die ohne Zweifel wichtigste Function des Muskels, mechanische Arbeit zu leisten, von gewissen, im Muskel vor sich gehenden Processen bedingt ist, durch welche also Energieumsetzung von chemischer in mechanische Form stattfindet.

Endlich hat man auch gefunden, dass der Muskel Wärme entwickeln kann, welche ohne Zweifel gleichfalls aus chemischen Processen im Muskel abgeleitet werden muss. Dass es chemische Processe in der organischen Welt giebt, welche mit Wärmeentwickelung verbunden sind, kennen wir sogar vom Pflanzenreich. Aber viel wichtiger für den Organismus ist die Wärmeentwickelung der Thiere — vor Allem der warmblütigen Thiere. Bei ihnen wird das wärmeproducirende Vermögen der Muskeln von durchgreifender Bedeutung für die Unterhaltung und Regulirung der Körpertemperatur. Bei den warmblütigen Thieren ist also die Aufgabe des Muskels in dem Organismus eine doppelte: mechanische Arbeit zu verrichten und Wärme zu entwickeln. Dass diese beiden Formen der Arbeit aus chemischer Energie des Muskels hervorgehen, glauben wir ja zu kennen, aber von der Natur dieses Chemismus wissen wir doch wenig. Welche Stoffe das Material liefern, und welche neue Molecüle aufgebaut werden, ist nocht nicht bestimmt; noch weniger kennt man, was die chemischen Reactionen in einem gewissen Augenblicke und in Folge des von aussen zugeführten Reizantriebes hervorruft oder einleitet. Und ebenso schwankend stehen wir vor der Frage: welcher Mechanismus vermittelt die Umsetzung der chemischen Energie in Arbeit?

Mit ziemlich grosser Wahrscheinlichkeit können wir annehmen, dass die chemische Umsetzung in verschiedenen Muskeln und auch in demselben Muskel unter verschiedenen Umständen ungleichen Umfang hat. Weiter haben wir gute Gründe anzunehmen, dass die chemischen Reactionen nicht unter allen Umständen gleicher Art sind, so dass z. B. der ernährende und restaurirende (anabolische) Process des ruhenden Muskels ein ganz anderer ist, als der destructive (katabolische) Process, welcher im arbeitenden Muskel stattfindet. Eigentlich laufen wohl im Allgemeinen mehrere Arten chemischer Processe im Muskel gleichzeitig ab, er möge in ruhendem oder in arbeitendem Zustande sich befinden; aber bald sind die restaurirenden Processe vorherrschend, bald die destructiven; ein Mal überwiegen die assimilatorischen Processe,

ein anderes Mal dissimilatorische; ein Mal wird der Energievorrath des Muskels aus den mit dem Blute zugeführten Stoffen bereichert, ein anderes Mal wird ein Theil dieser Energie verbraucht, indem sie umgesetzt wird — entweder in Arbeit, welche die mechanische Energie ausserhalb des Muskels anwachsen lässt, oder in Wärme, welche Anfangs die eigene Temperatur des Muskels steigert, nachher aber gewöhnlich allmählich abgeleitet wird.

Durch die Annahme, dass einige dieser chemischen Processe exothermischer Natur sind — verbunden mit Freimachen von Wärme — wird die Temperatursteigerung des Muskels ganz verständlich. Hiermit ist freilich nicht gesagt oder gemeint, dass nicht auch endothermische (wärmebindende) Processe im Muskel vorkommen können, obwohl die Beobachtungen, die man zur Stütze einer solchen Annahme möglicher Weise vorführen könnte, sicherlich einer näheren Prüfung bedürfen.

Wenn der Muskel im ruhenden Zustande sich befindet, scheinen die exothermischen Processe keinen hervorragenden Platz im Chemismus des Muskels einzunehmen. Offenbar verhält sich so der überlebende nicht durchblutete Muskel. Von durchbluteten Muskeln liegen Beobachtungen vor, welche wohl so gedeutet werden können, dass sie die entgegengesetzte Meinung stützen. Ich werde diese Beobachtungen unten in dem historischen Abschnitte näher berühren. Hier will ich nur daran erinnern, dass man nicht a priori entscheiden kann, ob nervöse oder andere Antriebe auf die Art des Muskelchemismus so einwirken können, dass dieser, ohne den Muskel dabei aus dem ruhenden Zustande zu bringen, von überwiegend exothermischer Natur wird. Ein derartiger Einfluss des Nervensystems auf die Wärmeleistung des Muskels gehört noch immer zu den unentschiedenen Streitfragen. Hiermit wird auch die Frage vom Mechanismus der Temperaturerhöhung im Fieber gestreift, welche wohl auf lebhaftes Interesse rechnen kann.

Dass die chemischen Processe im arbeitenden Muskel von überwiegend exothermischer Natur sind, wird wohl nunmehr kaum in Abrede gestellt. Es ist nämlich beobachtet worden, dass der Muskel im arbeitenden Zustande und ohne dass ihm Wärme von aussen zugeführt wird, höher temperirt wird. Daraus folgt doch nicht, dass eben diejenigen chemischen Reactionen, durch welche ein Theil der chemischen Energie des Muskels in mechanische Arbeit verwandelt wird, nothwendig von exothermischer Natur sind. Es könnte sich sehr wohl so verhalten, dass die exothermischen Processe jene Processe nur mehr oder weniger treu begleiten. Gehen ja sogar mehrere Beobachtungen

in der Richtung, dass die Wärmelieferung des Muskels innerhalb weiten Grenzen schwanken kann, ohne dass die mechanische Arbeit gleichlaufende Schwankungen aufweist.

Hier giebt es, wie wir sehen, mehrere Fragen von principieller Bedeutung, welche noch der Antwort warten. Man könnte wohl meinen, dass das in der Litteratur vorliegende Versuchsmaterial genügende Anhaltspunkte aufweisen könnte, um die Antwort auf einige dieser Fragen zu formuliren. Aber die Sache verhält sich so, dass diejenigen Experimente, die hier entscheiden sollten, oft unbestimmte, oft streitige, im Ganzen wenig zuverlässige oder überzeugende Antworten ergaben. Dies scheint mir wesentlich von folgenden zwei Umständen abzuhängen: erstens sind die Experimente, von welchen es hier handelt, ungemein spröder Natur, und zweitens war es manchmal schwer, sich von vorgefassten Meinungen los zu machen, was oft die Verwerthung und Deutung der gemachten Beobachtungen beeinflusst hat. Diese Vorwürfe gelten natürlich nicht Allen, die auf diesem Gebiete experimentirt haben, wie sich aus dem folgenden historischen Ueberblicke ergeben wird.

Meistentheils war aber die Versuchstechnik mangelhaft, vor Allem nicht genügend auf ihre Zuverlässigkeit gegen Einmischung störender Momente geprüft, so dass man befürchten kann, dass die beobachteten Wärmeausschläge nicht allein oder doch nicht hauptsächlich von demselben Faktor abhängen, den man in die Experimente einführen wollte und dessen Einfluss man aufzufinden beabsichtigte. Da aber manche, sogar mit verschiedenen Methoden ausgeführten Experimente zu übereinstimmenden Ergebnissen führten, so wuchs dadurch die Wahrscheinlichkeit, dass diese Ergebnisse richtig waren, und dies um so viel mehr, je mehr die Experimentirmethoden von einander verschieden waren, indem die Wahrscheinlichkeit, dass die mitwirkenden fremden Momente dieselben oder gleichwirkend sein sollten, damit vermindert wird.

Von diesem Gesichtspunkte aus betrachtet muss man theils bedauern, dass die bisher angewandten Untersuchungsmethoden nicht grössere principielle Verschiedenheiten aufzeigen, theils auch jede gute neue Methode freundlich begrüssen, besonders wenn sie grössere Zuverlässigkeit der Resultate sichert.

Geschichtlicher Ueberblick.

Eine vollständige, kritische Darstellung aller innerhalb dieses Gebietes bisher ausgeführten und publicirten Arbeiten würde ziemlich

lang und mühsam werden, gewiss ohne der Arbeit entsprechenden Gewinn zu bringen. Deshalb will ich nur solche Arbeiten erwähnen, die mir in irgend einer Hinsicht grösseres Interesse darzubieten scheinen. Besonders will ich mich bei denen aufhalten, welche einschlägige Experimente zur Discussion und Erläuterung der Frage aufzeigen. Dabei will ich specielle Aufmerksamkeit richten auf die Angaben über die Methoden und was ihre Brauchbarkeit und damit die Zuverlässigkeit der Ergebnisse erleuchten kann.

Um Wiederholungen zu vermeiden, führe ich nicht die kritisirenden Bemerkungen an einer Stelle zusammen, sondern stelle sie im Zusammenhange mit den Referaten der Arbeiten dar, wo ich nicht dem Leser selbst die Schlüsse zu machen überlasse.

Die ersten bekannten Versuche zu ermitteln, ob der Muskel bei der Arbeit Wärme producirt, wurde von einem Dänen, Dr. Bunzen (1),[1] im Anfange des vorigen Jahrhunderts (1805) gemacht. Die Versuche, welche gelangen, d. h. positive Resultate ergaben, wurden an überlebenden Muskeln kürzlich geschlachteter Thiere (einer Starke und eines Lammes) in der Weise ausgeführt, dass ein Luftthermometer zwischen den Muskeln eingebracht wurde, welche nachher mit sog. Armaturen, wie es zu jener Zeit üblich war, gereizt wurden. Dabei wurde die Zinkarmatur an den Hüftnerven und die Silberarmatur an den Muskeln des Unterschenkels gedrückt.

Im Jahre 1835 berichteten Becquerel und Breschet (2) über hierher gehörige Untersuchungen nach einer Methode, welche später oft angewendet wurde. Sie benutzten Thermosäulen aus Kupfer-Eisen in Nadelform, welche durch die Haut in die Muskeln lebender Menschen oder (warmblütiger) Thiere eingestochen wurden. Diese Thermonadeln wurden dann mit einem geeigneten Galvanometer verbunden und die Aufstellung war so empfindlich, dass die Verff. eine Erwärmung von 0·01° C. ablesen konnten. Sie fanden die Muskeln wärmer als das nächstliegende Unterhautgewebe. Bei mehrmaligen Zusammenziehungen stieg die Temperatur der Muskeln in einigen Versuchen bis zu 0·5° C. Manche Versuche gaben nur undeutliche oder sogar negative Erfolge. Die Verfasser schreiben die gefundenen Wärmeausschläge wesentlich dem in Folge der Zusammenziehung gesteigerten Blutzufluss zu, stellen aber auch in Frage, ob es nicht einen vom Nervensystem direct ausgehenden Einfluss auf die Wärmebildung im Muskel gäbe, eine Vorstellung, die wohl noch nicht ganz allgemein aufgegeben sein dürfte. Gewiss ist allerdings, dass der Blutstrom bei

[1] Siehe Litteraturverzeichniss.

Reizung des Muskels sich ändert und dass dies oft die Wärmeausschläge grösstentheils bedingt hat in den Versuchen, die mit Muskeln ausgeführt wurden, in welchen die Circulation noch bestand.

Helmholtz (3) war der Erste, der die Wärmeentwickelung des arbeitenden Muskels nach einer tadellosen Experimentalmethode gezeigt hat. Er benutzte überlebende circulationslose Froschmuskeln, die indirect (durch den Nerven) gereizt wurden. In diesen Muskeln war jede zweite der Löthungen einer dreifachen, aus dünnen Eisen- und Neusilberlamellen zusammengesetzten Thermosäule eingestochen. Die anderen Löthungen stach er in die nicht gereizten Muskeln des anderen Beines ein. Das Ganze war in einem Kasten mit gut angefeuchteter Luft, der sog. feuchten Kammer, eingeschlossen. Thermomultiplicator und Aufstellung waren so empfindlich, dass der kleinste ablesbare Ausschlag 0·00074° C. entsprach. Helmholtz giebt an, dass er nach 2—3 Minuten anhaltendem Tetanus des Muskels einen Ausschlag bekam, der einer Erwärmung von 0·14—0·18° C. entsprach, und nach längerem Tetanus noch grösser wurde. Dass die Ausschläge nicht von elektromagnetischen oder thermischen Wirkungen des gebrauchten Reizstromes veranlasst waren, wurde dadurch geprüft, dass dieselben Ströme, nachdem die Erregbarkeit des Muskels verloren war, nochmals durchgeleitet wurden und dann keine Ausschläge hervorbrachten. Auch wenn er dieselben Ströme durch den Muskel (nach eingebüsster Erregbarkeit) leitete, wie bei directer Reizung, bekam er nur sehr schwache Wirkungen auf die Nadel (Joule's Wärme).

Nicht eher als 1856 finden wir in der Litteratur einen Anfang, die hier erwähnten Versuche Helmholtz' zu wiederholen.

Matteucci (4) lieferte dann einen summarischen Bericht über einige von ihm angewandte Methoden, die Wärmeproduction der sich contrahirenden Muskeln zu demonstriren. So hing er in einer Flasche fünf präparirte Frösche, und zwischen diesen ein Thermometer auf, — oder er benutzte die Becquerel'sche Combination. Einen weit deutlicheren Ausschlag bekommt aber Matteucci, indem er zu den Thermosäulen Wismuth und Antimon verwendet, denen er eine derartige Gestalt gab, dass die Löthstellen in je ihren überlebenden Muskel desselben Frosches eingesteckt werden konnten. Der eine Muskel wurde indirect gereizt, und die Galvanometernadel zeigte sofort, dass der Muskel wärmer wurde, und nach 4 oder 5 Secunden Reizung machte die Nadel Ausschläge von 25 bis 30°. Wie viele Temperaturgrade damit angezeigt werden, sagt er nicht. Aber Matteucci hat sich überzeugt, dass mechanische Verrückungen der Muskeln Be-

wegungen der Magnetnadel nicht bewirken, oder höchstens ganz kleine, und übrigens in wechselndem Sinne.

Beclard (5) führte myothermische Untersuchungen aus theils an Menschen, theils an Fröschen, jene mit Quecksilberthermometer äusserlich an der den Muskel deckenden Haut, diese mit Thermonadeln in die lebenden (durchbluteten) Muskeln eingestochen. Das Problem, dessen Lösung er anstrebte, nämlich das Verhältniss der mechanischen Arbeit des Muskels zu seiner Wärmelieferung, bietet noch in dieser Stunde unvermindertes Interesse dar, aber seine Beiträge zur Lösung sind in Folge der unentwickelten Beschaffenheit seiner Methoden nicht viel werth. Er bemerkt selbst unter Anderem, dass, wenn er die Muskeln in eine feuchte Kammer bringe, die Resultate nicht so deutlich erschienen.

Edw. Solger's Arbeit (6), welche wenig Neues in methodischer Hinsicht vorführte, ist dadurch von Interesse, dass dort der negative Vorschlag — eine schnell vorübergehende Abkühlung, welche der Wärmetönung bei der Reizung des Muskels vorangeht — und der positive Nachschlag — eine nach beendigter Reizung fordauernde Erwärmung — zuerst erwähnt werden.

Im folgenden Jahre erschien die Arbeit von Meyerstein und Thiry (7). Sie brauchten als Messinstrument ein Galvanometer von Meissner-Meyerstein, und so empfindlich soll die Aufstellung gewesen sein, dass ein Scalentheil des Ausschlages einer Temperaturdifferenz von 0·00239 ° C. entsprach. Ein Zehntel eines Scalentheiles konnten sie schätzen. Kammförmige Termosäulen aus Neusilber—Eisen wurden in überlebenden Muskeln — Froschgastrocnemius — eingestochen. Die Verfasser sahen, wie Solger, negative Vorschläge, die in ihren Versuchen um so viel grösser ausfielen, je weniger der Muskel belastet war. Obgleich die Empfindlichkeit der Aufstellung so hoch angegeben wurde, fanden sie nicht messbare Wärmemengen bei Einzelzuckungen. Erst nach 10 Secunden Tetanus erreichte der Wärmeausschlag die zur Messung verwendbare Grösse. Auch ist zu bemerken, dass, wenn der Muskel beim Tetanus unbelastet, belastet oder so befestigt war, dass er sich nicht zusammenziehen konnte, sie doch keinen deutlichen Unterschied der Erwärmung des Muskels fanden.

Die in den Versuchen dieser Verfasser eingeführten Vorrichtungen, welche den Zweck haben, die Thermosäule die Bewegungen der Muskeln mitmachen zu lassen, waren nicht besonders gut gewählt, da sie Verschiebungen zwischen Muskel und Säule nicht verhüten konnten und dabei auch Variationen des Widerstandes der Thermoleitung bewirkten, so dass dieser Widerstand gewiss oft viel grösser war, als

ihn die Verfasser bei Berechnung der Empfindlichkeit seiner Aufstellung geschätzt haben.

Im Jahre 1864 erschien die grösste, bemerkenswertheste Arbeit (8) auf diesem Gebiet, durch welche nicht nur die myothermische Methodik, sondern auch die ganze, hier besprochene wissenschaftliche Frage einen bedeutenden Fortschritt machte.

Die Untersuchungen Heidenhain's wurden an überlebenden Froschmuskeln (Gastrocnemius) ausgeführt, die vom Nerven aus gereizt wurden. Die Wärme maass er mit thermoelektrischer Messmethode. Die Thermosäule war eine kleine Melloni'sche Würfelsäule aus Wismuth-Antimon, welche an einem beweglichen Gerüste[1] befestigt war und die Lothstelle der einen Seite an die Oberfläche des Muskels lehnte. Ueberdies war sie mit Nadeln an dem Muskel festgesteckt. Die Lothstellen der anderen Seite der Säule waren mit einem Bausch aus feuchtem Fliespapier zugedeckt. Das Ganze sammt Reizelektroden war übrigens in einer feuchten Kammer eingeschlossen, durch deren Boden die elektrischen Leitungsdrähte und ein Faden von dem Muskel zum Längenschreiber (Pflüger's Myographhebel) eingeführt wurden.

Als Messinstrument für die Thermoströme benutzte Heidenhain ein Spiegelgalvanometer Wiedemann's, den er doch ein wenig modificirt hatte, um seine Empfindlichkeit zu vermehren. Die Aufstellung war so empfindlich, dass ein Scalentheil des Ausschlages einer Temperaturdifferenz zwischen den Löthstellen von 0.0005° C. entsprach, und da halbe Scalentheile sicher abzulesen waren, konnte also das Viertel eines Tausendstel Grades Celsius gemessen werden.

Den naheliegenden Einwand, dass die geringen Wärmeausschläge des Galvanometers bei den Einzelzuckungen von der Reibung des Muskels an der Thermosäule herzuleiten waren, findet Heidenhain ein für alle Mal durch folgende Beobachtungen beseitigt (S. 74). „Erstens fährt die Erwärmung nicht fort, wenn man den vom Nerven aus gereizten Muskel sich zu verkürzen verhindert. Zweitens habe ich wiederholt folgenden schlagenden Controlversuch angestellt. Ich befestige an der Klammer I zwei Wadenmuskeln unter einander, den unteren an der Achillessehne des oberen. Der untere wird, ganz als sollte er zu einem gewöhnlichen Versuche dienen, mit seiner Tibialfläche an die Säule angelegt und mit einem Gewichte belastet. Aber er wird nicht selbst

[1] Dieses Gerüst war aus Metallstäbchen hergestellt, welche zu einem doppelten Parallelogramm gelenkig verbunden waren und die trägen Massen, die der Muskel bei den Zuckungen in Bewegung zu setzen hatte, nicht unerheblich vermehrten.



gereizt, sondern der obere durch Reizung seines Nerven zu Zusammenziehungen veranlasst. Dieser zieht dann bei jeder Zuckung den unteren auf der Säule hin und her. Um die Reibung dabei zu vergrössern, stellte ich die Säule unverrückbar fest und fixirte den Muskel nicht auf dem Korkrahmen. Trotzdem habe ich selbst bei 40 auf einander folgenden Zuckungen noch keinen Wärmeeffect beobachtet. Einige Male zeigte im Gegentheil die Boussole Anfangs einen Ausschlag im Sinne einer Abkühlung". Diese Abkühlung leitet Heidenhain von dem Umstande ab, dass der Muskel aus naheliegenden Gründen immer ein wenig kälter als die ihn umgebende Luft war. Er nimmt sehr allmählich die Temperatur derselben an, am schnellsten an den Punkten, welche mit den metallischen Thermoelementen in Berührung stehen. Bei diesem Versuche verlässt die Thermosäule die von ihr erwärmten Punkte und kommt mit weniger warmen in Berührung.

Heidenhain bekam mit seinem Apparate für einzelne Muskelzuckungen Ausschläge, welche nach den Umständen zwischen 2 und 10 Scalengraden wechselten, was 0·001—0·005° C. entsprach.

Unter den Resultaten Heidenhain's will ich hervorheben, dass er keine erwähnenswerthen thermischen Wirkungen von Muskeldehnungen beobachtete, und dass die von Solger und Meyerstein und Thiry beobachteten negativen Wärmeschwankungen davon herrührten, dass die Thermosäule bei der Zuckung mit anderen Theilen des Muskels in Berührung kommt, welche Theile in Folge der Wasserverdunstung von der freien Oberfläche des Muskels kälter waren, während die Theile des Muskels, welche die Säule vor der Zuckung berührten, gegen Abdunstung geschützt waren und deshalb eine der der umgebenden Luft näher liegende Temperatur annahmen.

Interessant ist übrigens, dass Heidenhain bei seinen Untersuchungen über das Verhältniss der mechanischen Leistungen des Muskels zu den thermischen von der vorgefassten Meinung ausging, dass der Energieumsatz in der Zusammenziehung des Muskels bei unverändertem Reize auch unverändert bleiben sollte, und um so mehr davon in der Wärmeform zum Vorschein kommen müsste, je weniger in der Form mechanischer Arbeit erschien. Nun waren freilich die Einrichtungen, um die Muskelarbeit zu messen, ganz ungenügend. Aber dies bedeutet wenig, weil dieselbe Arbeit in Heidenhain's Versuchen gleich wieder zu Wärme im Muskel umgesetzt wurde; wenigstens ist es sehr wahrscheinlich, dass es so geschehen ist mit dem allergrössten Theil der Arbeit. Folglich wäre den Versuchsbedingungen gemäss zu warten, dass die Temperaturausschläge bei allen Versuchen mit un-

verändertem Reize gleich ausfallen sollten und unabhängig von den Belastungsverhältnissen u. s. w. während der Zusammenziehung. Heidenhain bekam aber ganz andere Resultate.

Er fand ebenso einen Einfluss der Ermüdung des Muskels auf die Wärmeentwickelung bei den Zuckungen. „Mit fortschreitender Ermüdung sinkt die Wärmeentwickelung schneller als die Arbeit“ . . . „Die Ermüdung kann sich bereits in einem Sinken der Wärmeentwickelung geltend machen, bevor sie noch an einem Sinken der Arbeit merklich wird.“ Bei sehr hohen Ermüdungsgraden wurde die Temperaturerhöhung für seine Apparate unmessbar, während die Arbeit noch keineswegs verschwindende Werthe aufwies. — Es ist dies ein sehr beachtenswerther Fund, dass der Muskel mechanische Arbeit liefern kann bei so geringfügigem Energieumsatz, dass sie in Wärme überführt (?), nicht merkbar war.

Einer anderen eigenthümlichen Erscheinung begegnete Heidenhain, wie auch andere Verfasser vor und nach ihm, die nämlich, dass bei den ersten Zusammenziehungen nach einer längeren Ruhepause die Wärmeentwickelung nicht selten verhältnissmässig (mit der Arbeit verglichen) grösser ausfällt, als bei den unmittelbar darauf folgenden Zuckungen. Heidenhain lässt die Erscheinung ohne Erklärung oder nähere Beleuchtung.

Uebrigens hat Heidenhain viel Arbeit verwandt auf das Studium des Verhaltens der Wärmeentwickelung zur Arbeit bei Aenderung der Belastung zuckender oder tetanisirter Muskeln. Die wichtigsten Resultate sind in folgenden Sätzen zusammengefasst worden.

Wenn man den Muskel mit steigenden Gewichten vor oder während der Reizung belastet, so steigt bis zu einer gewissen Grenze gleichzeitig die mechanische Leistung und die Wärmeentwickelung desselben; jenseits jener Grenze nehmen beide ab, und zwar, sicher wenigstens bei Einzelzuckungen, die Wärmeentwickelung früher als die mechanische Leistung. Wenn der Muskel sich zu verkürzen verhindert wird (isometrische Zuckungen oder Tetanus nach Fick's Benennung), so steigt die Wärmeentwickelung mit der Anfangsspannung und wird grösser, als wenn es dem Muskel gestattet wird, sich von derselben Anfangsspannung zu verkürzen. Auch hier giebt es ein Optimum, jenseits dessen die Erscheinungen sich umgekehrt verhalten.

Endlich ist zu bemerken, dass diese Arbeit auch Versuche umfasst, welche dahin zielen, den Stoffumsatz bei der Muskelwirksamkeit unter verschiedenen Verhältnissen nach der grösseren oder kleineren Menge im Muskel entwickelter Säure zu bestimmen. Diese Versuche

gaben Heidenhain Resultate, welche mit den schon referirten gut stimmten.

Im Jahre 1865 publicirte Paul Dupuy (9) seine nach Beclard'schem Muster erfolgten Untersuchungen, welche doch keineswegs zu den von Beclard gefundenen Resultaten führten. Sie haben ihre Bedeutung wesentlich deswegen, dass sie die Unzulänglichkeit der angewendeten Methode für solche Untersuchungen noch weiter bestätigten.

Westermann's (10) Dissertation ist auch wesentlich für die Methodik von Interesse. Er brauchte eine Heidenhain's Säule ähnliche, aber nach Westermann's Schätzung 8 Mal empfindlichere Aufstellung. Er bekam, als er wie Heidenhain die Säule gegen den Muskel reiben liess, nur geringfügige Ausschläge. Dagegen bekam er Wärmeausschläge bei der Dehnung des Muskels, keine aber wenn er einen Zwirnbausch auf dieselbe Weise wie den Muskel behandelte, „während seine Reibung an der Säule nur ein Weniges geringer ist, als die des Muskels". Dehnte er den Muskel in trockener Kammer, so wurde der Ausschlag viele Mal grösser als in feuchter Kammer. Westermann hat Ausschläge bis 658^{mm} verzeichnet (S. 44), und zwar bei Belastung eines feuchten todten Muskels in trockener Kammer mit einem Gewicht von 200^{g}.

Valentin (11) hat einen kurzen Bericht über hierhergehörige Untersuchungen erstattet. Sie wurden auch an überlebenden Froschmuskeln mit Thermonadeln aus Eisen – Neusilber und mit Spiegelgalvanometer ausgeführt. Seine Aufstellung war so empfindlich, dass die Ausschläge reducirt werden mussten, indem ein Shunt aus Neusilberdraht angebracht wurde. Diese übermässige Empfindlichkeit ist jedoch mehr scheinbar und kommt wesentlich von dem grossen Scalenabstande — 5·5^{m} — her. In Versuchen mit 30 Secunden Tetanus bekam er Ausschläge, welche einer Erwärmung von 0·05—0·17^{0} C. entsprachen. Er arbeitete dann mit so grosser Empfindlichkeit, dass ein Scalentheil des Ausschlages eine Temperaturdifferenz von 0·047^{0} C. anzeigte.

Im folgenden Jahre erschien die erste Arbeit A. Fick's (12) auf diesem Gebiet. Bei seinen ersten Versuchen brauchte er Heidenhain's Säule, einen gut astatisirten Galvanometer nach Meyerstein, aber etwas empfindlichere Aufstellung als Heidenhain. Fick beobachtete damals auch die öfters besprochene „negative Wärmeschwankung" und bemerkt in einer Note, dass er Heidenhain's Meinung, es handle sich um einen blossen Fehler, doch nicht theilen kann. Uebrigens bezwecken diese Untersuchungen nichts weniger als das Verhältniss des totalen Energieumsatzes zu der nützlichen Arbeit bei Muskelzuckungen zu bestimmen. Fick kommt später und mit viel

besseren Mitteln zu demselben Problem zurück, weshalb das schon Angedeutete hier genügen möge.

Diese Fick'sche Arbeit giebt aber Heidenhain Veranlassung, neue Versuche (13) anzustellen, durch welche er glaubt gezeigt zu haben, dass, wenn der Muskel im Stadium der Wiederausdehnung ungespannt ist, der Energieumsatz kleiner wird, als wenn er auch während dieses Stadiums der Zuckung belastet bleibt. In jenem Falle sollte die Menge producirter Säure kleiner werden und die Zuckungen weniger ermüdend wirken. Die Ergebnisse seiner Versuche beweisen in der That ziemlich wenig. Von den Versuchen über die Säurebildung gaben nur 66 % (38 von 57) postitiven Ausschlag, und von den Versuchen, wo die Belastung mehr als 90 g war, gaben sogar nur 40 % positiven Ausschlag. Der Einfluss auf die Ermüdung wird nur in zwei Versuchen gezeigt, und gegen die Technik dieser Versuche können übrigens gut begründete Einwände erhoben werden.

Fick geht in seiner nächsten Arbeit (14) von der Annahme aus, dass im Verkürzungsstadium ein chemischer Process abläuft, der theils mechanische Arbeit, theils Wärme abgiebt, und dass ein neuer chemischer Process während der Wiederausdehnung dazu kommt, welcher auch Wärme frei macht. Er fragt, ob Wärme auch im Laufe des Tetanus frei wird. Seine Versuche bestätigten dies, aber sie zeigten ausserdem, dass die frei gemachte Wärmemenge kleiner war als in dem Stadium der Gestaltveränderungen. Die Tetanuswärme stieg mit der Intensität und Frequenz der Reizung, so lange der mechanische Effect auch wuchs. Doch bekam er bei sehr grosser Häufigkeit der Reizanstösse Wärmemengen, welche die bei einer raschen Folge getrennter Zuckungen entstandenen sogar überstiegen; und bei isometrisch verlaufendem Tetanus wuchs die Muskeltemperatur mit der Reizfrequenz in infinitum. — Fick sah die Wärmeausschläge noch immer anwachsen zu einer Zeit, wo längst die Reizung des Muskels vorüber war, was ihn zu theoretischen Erörterungen über eine womöglich existirende, von der Ermüdung beeinflusste Nachwärmung veranlasste.

J. Steiner (15) arbeitete mit Heidenhain's Säule, aber mit einem viel empfindlicheren Galvanometer, so dass er bei einer Secunde Tetanus eines mit 10 g gespannten Muskels einen Ausschlag von 70 Scalentheilen bekam, wenn der Muskel auf der Contractionshöhe entlastet wurde, und bisweilen 130 Scalentheile erreichte, wenn die Spannung dagegen auf der Höhe mit 30 g vermehrt wurde. Er liess nämlich den Muskel sich mit schwacher oder keiner Belastung zusammenziehen, und mit oder ohne Last sich wieder ausdehnen, indem er den Muskel auf dem Höhepunkte entlastete oder noch weiter belastete, und be-

obachtete in diesem Falle mehr Wärme (Maximum bei 60 g Belastung). Bei Dehnung des ruhenden Muskels kein Wärmeausschlag. — Steiner theilt selbst mit, dass er bisweilen durch abnorme Ausschläge gestört wurde, welche er doch schliesslich zu beherrschen lernte (aber nicht zu erklären?).

J. Nawalichin (16) arbeitete auch mit Heidenhain's Apparat. Er bemerkt, dass die Wanderungen des Nullpunktes der Magnetnadel an manchen Tagen seine Beobachtungen störten. „Es bedarf des Zusammentreffens der günstigsten, dem Willen des Experimentators oft entrückten Bedingungen, um zu tadellosen und vertrauenswürdigen Beobachtungen zu gelangen, und es bedurfte für mich unverhältnissmässig langer Zeit, um trotz der vielfachen Schwierigkeiten die nothwendige Sicherheit in der Beurtheilung des Gesehenen zu erwerben". Nur grosse Frösche „auf der höchsten Stufe der Erregbarkeit" taugten für seine Versuche. „Merkwürdig genug, dass bei schlecht genährten Thieren die Wärmeproduction des Muskeln verhältnissmässig viel stärker zu sinken scheint, als ihre mechanische Leistungsfähigkeit —, wie ja bekanntlich für die Ernährung dasselbe gilt." Daher fand er, dass 1. die Wärmeproduction mit der Hubhöhe aber viel schneller als diese wächst. NB. es war die Belastung constant, die Reizung variabel. 2. Doppeltreizungen (maximale) erhöhen nicht die Zuckungswärme, wenn die Reize so schnell einander folgen, dass die mechanische Arbeit nicht beeinflusst wird. Daraus schliesst Nawalichin, dass die Wärmeproduction nicht während des Stadiums der latenten Reizung stattfindet. 3. Wenn der Myographionhebel, an welchem das Gewicht hängt, zwischen den einzelnen Zuckungsversuchen successive um kleine Grössen gehoben und dann unterstützt wird, so entwickelt der Muskel um so weniger Wärme, je geringer seine Spannung vor der Thätigkeit war — und, möchte ich hinzufügen, je geringer seine Länge bei beginnender Hebung der Last ist. 4. Die Versuche mit variirender Ueberlast fielen so aus, dass in einigen Fällen die Zuckungswärme mit der Grösse der Ueberlast wuchs, aber „so glatt verlaufen bei diesen Beobachtungsreihen nicht alle Versuche. Der Einfluss der Spannungsänderung während der Thätigkeit ist viel geringer als der Einfluss der gleichen Aenderung vor Beginn der Thätigkeit, deshalb sinkt jener Einfluss mitunter in die Grösse der unvermeidlichen Versuchsfehler". 5. Das beschleunigte Anwachsen der Wärmeproduction des Muskels ist nicht aus einer Verlängerung des zeitlichen Verlaufes der Zuckung ableitbar, denn die Verlängerungszeit ändert sich mit der Reizgrösse nicht.

Im Jahre 1878 führte Fick (17) einige wesentliche Verbesserungen

der myothermischen Methode herbei, welche sicherlich nicht wenig beigetragen hat, neue Versuche auf diesem Gebiete hervorzurufen. Anstatt die Thermosäule gegen die Oberfläche des Muskels zu legen, änderte er die Form der Säule so, dass die dünnen Löthstellen in einer einfachen gedrängten Reihe über einander lagen und zwischen zwei an einander liegenden Muskeln versenkt werden konnten. Die 6- bis 12 gliedrigen Säulen waren aus Eisen—Neusilber hergestellt, und so schwach als nur möglich, damit sie die Temperatur der umgebenden Muskeln schnell annehmen können. Um der Säule die Beweglichkeit zu geben, welche nöthig war, damit sie den Excursionen der Muskeln folgen könne, tauchten die Enddrähte der Säule in Quecksilbernäpfchen, welche mit den Leitungsdrähten zum Galvanometer verbunden waren. Der Galvanometer war auch neu. Ein fester Astatisirungsmagnet war nicht vorhanden, sondern ein astatisches Nadelpaar, damit die Empfindlichkeit nicht von den Variationen des Erdmagnetismus beeinflusst werden sollte und über längere Zeitperioden constant bleibe. Dagegen wurde die Aperiodicität als weniger wichtig geopfert.

Die Empfindlichkeit der Aufstellung war so gross, dass eine Mittelablenkung von einem Scalentheil eine Temperaturdifferenz von 0·000314 bezw. 0·000329° C. für zwei von den öfters gebrauchten Säulen entsprach. Da nun anzunehmen war, dass die zwischen den Muskeln versenkten Löthstellen dieselbe Temperatur wie diese Muskeln haben sollten, meinte Fick aus der Grösse der Ablenkungen und der specifischen Wärme der Muskelsubstanz die für jedes Gramm Muskel freigemachte Wärmemenge berechnen zu können. Auf solche Weise berechnete er, dass 1^{g} lebenskräftiger Froschmuskel bei energischer Zuckung gegen grossen Widerstand eine Wärmemenge frei machte, die genügte, um 3^{mg} Wasser von 0—1° C. zu erwärmen (3 Mikrocalorien). Unter den übrigen Folgerungen wäre zu nennen, dass, wenn er das Muskelpräparat direct durch Inductionsschläge reizte, diese keine merkbare oder störende Erwärmung der Muskeln bewirkten; weiter, dass der Muskel, wenn der Widerstand zunahm, nicht nur energischer, sondern auch ökonomischer, d. h. im Verhältniss zur mechanischen Leistung mit kleiner Wärmeproduction arbeitete. Der mechanische Effect konnte unter günstigen Umständen bis zu einem Viertel der ganzen umgesetzten Energie steigen.

Die nächste Arbeit auf diesem Gebiete kommt auch aus Fick's Laboratorium, wo nun Danilewsky (17) einige Untersuchungen mit den Fick'schen Apparaten durchgeführt hat. Danilewsky erachtet seine Aufstellung so empfindlich, dass er, indem er $^1/_4$ Scalentheil schätzte, Temperaturdifferenzen von 0·00003° C. beobachten konnte.

Durch Einführung von Widerständen in der Thermoleitung ermässigte er die Empfindlichkeit zu 0·00016—0·015° C. per Scalentheil. Dabei sorgte er dafür, dass die Kammer gut gefeuchtet wurde. Danilewsky bestimmte die Erwärmung „von Kautschukstreifen und Muskeln durch Erschütterungen“, d. h. sehr kurzdauernden Dehnungen. In solchen Versuchen wird ohne Zweifel nicht die ganze Dehnungsarbeit zur Erwärmung des Kautschuks bezw. Muskels verbraucht. Gleichwohl wird die aus seinen Versuchen mit Kautschuk berechnete Grösse des mechanischen Wärmeäquivalentes oft kleiner als 430, was in der einen Versuchsreihe sogar der Durchschnittswerth war und auffallend erscheint. Auch bei den Muskelversuchen wird J bisweilen kleiner als 425, doch öfters 500—600. In einigen Versuchen, wo ein Kautschukstreifen zwischen Muskel und dehnendes Gewicht eingeschoben war, gab die Fallarbeit gar keine Erwärmung des Muskels, sondern es sollte dann alle Wärme im Kautschukstreifen frei geworden sein. In einigen Versuchen ist bemerkt worden, dass die mehr oder weniger bedeutende bleibende Ausdehnung des Muskels besonders bei den ersten Erschütterungen und nach langen Pausen von sehr grossen Wärmeausschlägen begleitet wurde, so dass J, nach diesen Versuchen berechnet, auf 201, 226, 133 und sogar 70 heruntergehen sollte. Danilewsky nennt die sonderbare Erscheinung paradoxale Erwärmung und sucht sie auch zu erklären. Aber bei näherem Ansehen eines als Muster angeführten Versuchsprotokolles zeigt es sich, dass die grössen Ausschläge nicht von einer entsprechenden Erwärmung des Muskels herrühren können.

Danilewsky bekommt bei einfachen Zuckungen (ohne nützliche Arbeit) gegen träge Massen Ausschläge, die bis zu 30 Scalentheilen stiegen, einer Erwärmung von 0·0035° C. entsprechend; in einer späteren Abhandlung wachsen die Ausschläge bis zu 40—60 Scalentheilen oder 0·1° (0·092°) C., was beinahe 9 Mikrocalorien per Gramm Muskel ergiebt. In einem Versuche mit zeitstarrem Muskel notirt er Dehnungswärme von 27 Mikrocalorien per Gramm Muskel.

Seine Präparate producirten bei isometrischen Zuckungen mehr Wärme, je stärker sie gereizt wurden. Bei subminimaler Reizung producirten sie auch Wärme. Mit Recht kann man hier fragen, ob Danilewsky genügend Sorge getragen hat, um den Einfluss der Reizströme und Elektromagnete zu verhüten u. s. w.

Weiter findet er, dass der Muskel bei schwachem Reize mehr ökonomisch arbeitet als bei starkem. Bis 44 % der umgewandelten Energie hat Danilewsky in der Form mechanischer Arbeit bekommen, und er glaubt, dass, wenn er nicht träge Massen mit gehabt hätte, er 50 % oder mehr könnte bekommen haben.

Ein paar andere, nicht ganz unwichtige Aufschlüsse giebt uns Danilewsky, indem er zwischen mehr „zuverlässigen" und weniger „zuverlässigen Versuchen" scheidet und bemerkt, dass jede Manipulation, die von einer Bewegung des Muskels begleitet wird, Schwingungen des Magnets hervorruft.

Endlich ist zu erwähnen, dass Danilewsky auch eine Erwärmung des Froschmagens selbst bei Reizung mit einfachen, ziemlich schwachen Inductionsschlägen — noch mehr natürlich bei Tetanus — aufzeigen konnte.

Besonders grosses Interesse bieten Meade-Smith's (19 und 22) Untersuchungen dar. Sie wurden an Hunden und Kaninchen mit Quecksilberthermometern ausgeführt, welche er in die Blutgefässe so eingefügt hatte, dass er die Temperatur (mit einer Genauigkeit von 0·01° C.) des dem Muskel zu- und abfliessenden Blutes ablesen konnte. In einigen Versuchen wurden die Muskeln durch die eigene Fürsorge des Organismus durchblutet, in anderen Versuchen durch künstliche Mittel, und in einer dritten Versuchsreihe war die Circulation in den Muskeln aufgehoben. In allen Versuchen wurde bei Tetanisirung der Muskeln eine deutliche Wärmesteigerung beobachtet, welche von einer Wärmeproduction in den Muskeln wenigstens in allen den Fällen herzuleiten war, in welchen die Temperatur der Muskeln oder des von ihnen abfliessenden Venenblutes höher war, als die des arteriellen Blutes. Sonderbarer Weise zeigte sich kein deutlicher Einfluss auf die Grösse der Wärmeproduction von grösserer oder kleinerer Belastung oder Verkürzung der Muskeln. In einem folgenden Aufsatze bespricht er den Einfluss der Circulation auf die Wärmeproduction. In seinen Versuchen gab der durchblutete Muskel immer viel mehr Wärme als der circulationslose.

Magnus Blix (20) arbeitete auch in Fick's Laboratorium und mit Fick's Apparaten. Die Aufstellung hatte eine solche Empfindlichkeit, dass ein Scalenteil 0·000147° C. entsprach. Eine Zuckung ohne nützliche Arbeit gab Ausschläge von 18 bis 36 Scalentheile (bei 90 g Belastung und mit trägen Massen) oder 0·002646 bis 0·005292° C.

Blix beobachtete Wärmeausschläge bei Dehnung, und mit den Dehnungen wachsend ganz wie Westermann. Wiederholte, kurzdauernde Dehnungen gaben ihm kleine, aber deutliche Wärmeausschläge, welche mit der zwischen der Belastungs- und Entlastungscurve in Folge der Nachdehnung eingeschlossenen Fläche (verlorene Arbeit) zusammengestellt wurde. Er constatirte auch den Einfluss der Feuchtigkeit auf die Grösse dieser Ausschläge (2 : 3). Die Wärmeausschläge nach einer Zuckung oder Dehnung erreichten ihr Maximum nach zwei

Oscillationen und sanken dann langsam herunter — bis etwa $^{3}/_{7}$ in einer Minute. Auch sah er den Muskel sich scheinbar abkühlen — bis 23 Scalentheile —, wenn er auf der Höhe der Zusammenziehung entlastet wurde, was wohl davon abzuleiten ist, dass die Thermosäule durch Verschiebung mit anderen, kälteren Theilen des Muskels in Berührung gekommen ist. Dasselbe gilt wahrscheinlich von den meisten Dehnungsausschlägen und hat wohl oft auch auf die anderen Versuchsergebnisse eingewirkt.

Es folgen jetzt zwei Arbeiten von Fick (21 und 22), welche in theoretischer Hinsicht wichtige Fragen berühren. Zu endgültiger Entscheidung der aufgestellten Fragen führten diese Untersuchungen, genauer geprüft, kaum. Die Methodik ist treffend, die Wärmebestimmung unverändert.

Ugolino Mosso (24) maass mit Thermometern, welche in 50stel Grade getheilt waren, die Temperatursteigerung der den Thermometer umgebenden gereizten Froschmuskeln, wobei er fand, dass die Temperatursteigerung ebensowohl nach wie während der Reizung eintreten kann.

Weiter hat er die Körpertemperatur an Hunden und an sich selbst während und nach anhaltender Arbeit gemessen, da er sich aber nicht über den Wärmeverlust erkundigt hat, haben diese Messungen für die Bestimmung der Wärmeproduction wenig zu bedeuten.

Endlich glaubt Mosso beobachtet zu haben, dass strychninisirte Frösche Anfangs mehr Wärme produciren, auch ohne sichtbare Muskelthätigkeit in Folge gesteigerter Reizbarkeit der Nerven (?). Curarisirte Frösche zeigen nach dem ersten Stadium vermehrter, ein zweites Stadium verminderter Wärmeproduction. Wenn Frösche in diesem Stadium mit Essigsäure gereizt werden, steigt die Wärmeproduction wieder an — ebenso wenn sie in diesem Stadium strychninisirt werden, und zwar ohne dass Spuren von Bewegungen der Frösche sichtbar werden. Curarisirte Hunde zeigten eine Temperaturerhöhung bis 3° C., weshalb eine gesteigerte Wärmeproduction auch hier dem Verfasser wahrscheinlich vorkommt. Diese Untersuchungen streifen hart an die wichtige Frage einer von der Muskelzusammenziehung durchaus unabhängigen Wärmeproduction des Muskels und verdienen unzweifelhaft nähere Beachtung.

Lukjanow (25) führte Meade-Smith's Untersuchungen in Ludwig's Laboratorium weiter. Seine Thermometer waren in 0·1° C. getheilt, mittels der Lupe konnten dann 0·05 bis 0·01° C. und ganz sicher 0·1° C. abgelesen werden. — Die Temperaturerhöhung ging bei einer Zuckung eines warmblütigen, circulationslosen Muskels bis auf 0·001 bis 0·0042°. Die grösste Temperatursteigerung zeigten solche Muskeln nach 1200 bis 1400 Zuckungen, und zwar 1·15° C. oder

1 Grammcalorie für 1 g Muskelsubstanz. — Im Tetanus gab jede Reizung weniger Wärme als bei einzelnen, auch superponirten Zuckungen. Je schneller die Reize einander folgten, um so viel weniger wurde der Wärmeeffect jedes Reizes, wenn die Reize nicht in gar zu grossen Intervallen (z. B. 1 Secunde) fielen. In durchbluteten Muskeln könnte die Temperatur stundenlang anwachsen und mehrere Grade erreichen ungeachtet der Abkühlung durch das kältere Arterienblut. In nicht durchbluteten Muskeln wurde die Temperaturerhöhung viel geringer und hörte nach wenigen Minuten auf. Wie aus Meade-Smith's, so ging auch aus mehreren Versuchen Lukjanow's hervor, dass die Belastung auf die Zuckungswärme keinen Einfluss ausübte. Andere seiner Versuche deuten ein entgegengesetztes Verhältniss an. — Auch Kröten- und Froschmuskeln machten, wenn sie mehr (300 bis 1300 Mal) gereizt wurden, an seinem Thermometer sichtbare Wärmemengen frei, z. B. 0·55° C. nach 300 Reizen. Die Krötenmuskeln ermüdeten dabei später, Wärme zu produciren, als die Froschmuskeln. — Ermüdete Hundemuskeln hören auf, messbare Wärmemengen zu liefern, ehe die Arbeitsfähigkeit erschöpft ist. Indessen schliesst Lukjanow seine Arbeit mit der Bemerkung, dass die Methode vielfache Verbesserungen erfordere.

Starke (26) arbeitete in Ludwig's Laboratorium mit Fick's Säule über den Einfluss träger Massen auf die Arbeit und Wärmeproduction des Muskels. Die Thermoströme maass er mit einem Spiegelgalvanometer nach F. Kohlrausch und die Empfindlichkeit der Aufstellung war so gross, dass ein halber Scalentheil des Ausschlages, der mit Sicherheit abzulesen war, 0·00007° C. entsprach. Eine einfache Zuckung eines Froschmuskels gab einen Ausschlag von 4 bis 30 gewöhnlich zwischen 10 und 20 Scalentheilen, also eine Temperaturerhöhung von 0·00028° C. als Minimum und 0·0021° als Maximum.

Chauveau (27) suchte bei Homöothermen an Muskeln in situ und möglichst physiologischen Verhältnissen sowohl den Gaswechsel und die Glykogenaufnahme, als auch die Temperaturverhältnisse zu bestimmen, nicht nur im Muskel selbst, sondern auch in dem zu- und abfliessenden Blute und an der überdeckenden Haut (beim Menschen). Die Temperaturwechsel studirte er vermittelst Thermonadeln, die in ein paar symmetrischen Muskeln eingesteckt waren, von diesen war der eine durch Nervenschnitt paralysirt, während der andere seine physiologische Function vollführte oder durch von aussen zugeführte Reize in Thätigkeit versetzt wurde. Auch hat er mit seinem Thermometer, an welchem er 0·001° C. schätzen konnte, Muskeltemperaturbestimmungen vorgenommen. Bei Hunden sah er erst Ab-

kühlung während ein paar Minuten, oder so lange die Zusammenziehung dauerte, dann eine Temperatursteigerung, welche nach 6 bis 10 Minuten ihr Maximum erreichte. Die Ergebnisse sind sehr unzuverlässig wegen der vielfachen Complicationen, vor allen Dingen wegen der unbeständigen und ganz unberechenbaren Reizintensitäten, was auch eine Vergleichung mit den Versuchsergebnissen anderer Forscher unausführbar macht. So viel scheint aber aus diesen Versuchen hervorzugehen, dass der Austausch der Respirationsorgane und die Aufnahme des Glykogens während und nach der Arbeit etwas lebhafter ist als im paralysirten Muskel, gleichviel, ob die Muskelarbeit einen nützlichen Effect brachte, oder nicht.

Ob die mit dem Thermometer an der Hautoberfläche beobachteten Temperaturen von der Wärmeproduction der unterliegenden Muskeln direct abhängen, muss sehr in Abrede gestellt werden. Näher liegt es ja, die hier constatirten Temperaturveränderungen auf Aenderungen in den Circulationsverhältnissen zu beziehen.

Fritz Schenck (28) gehört Fick's Schülerkreise an. Er brauchte eine 16 gliedrige, 1 ^{cm} hohe Säule, ohne damit die Empfindlichkeit weiter zu treiben als mit Fick's 10 gliedriger, was er dem vermehrten Leitungswiderstande zuschreibt. Ein Scalentheil entsprach 0·0003° C. Einfache Zuckungen gaben Ausschläge von 6 bis 30 (63!) Scalentheilen, also 0·0018 bis 0·009° C. Schenck wiederholte Fick's Versuche, die Wärme der Schleuderzuckungen und der isometrischen Zuckungen mit einander zu vergleichen. Die Ergebnisse zeigten nicht völlige Uebereinstimmung.

Wesentlich neue Gesichtspunkte brachte Fick's nächste Arbeit (29) Der wärmemessende Apparat war unverändert und 1 Scalentheil entsprach 0·00036° C.

Mit Blix' Muskelindicator wurden tetanisirte Froschmuskeln belastet oder entlastet, und wurde die Wärme bei den Entlastungsversuchen grösser gefunden als bei den Belastungen, besonders wenn das Wärmeäquivalent des mechanischen Effectes algebraisch hinzuaddirt wurde. Wird ein vollständiger Cirkelprocess mit Belastung und Entlastung oder umgekehrt mit vorausgehender Entlastung und nachfolgender Belastung durchgemacht, so wird die Wärmemenge in diesem Falle grösser (bis das Doppelte). Fick folgert daraus, dass es die Arbeitsleistung des Muskels ist, die den Verbrauch seiner chemischen Energie fördert. Die Unterhaltung der Spannung ohne Verkürzung oder Verkürzung ohne Spannung erfordern, meint er, weniger Energieumwandlung als die Erzeugung mechanischer Arbeit. — Folglich müsste auch ein Tetanus mit Entlastung mehr Wärme geben als ein

isometrisch verlaufender Tetanus. Fick's Versuche zeigten aber nicht den erwarteten Unterschied, was er dem Umstande zuschreibt, dass er die Entlastung zu schnell durchgeführt hatte, so dass der Muskel eine Zeit lang in unbelastetem Tetanus verharrt und in dieser Zeit weniger Wärme geliefert hatte, als im isometrischen Tetanus mit seiner weit grösseren Spannung. Die Ergebnisse der Cirkelversuche nöthigen ihn zu der Annahme, dass der Muskel bei spannungsloser Zusammenziehung zu einem kurzen elastischen Strang umgewandelt wird, welcher sich zu dehnenden Kräften wie ein Kautschukstrang verhält, ohne — oder allerdings mit weit geringerem Umsatz chemischer Kräfte als es stattfindet, wenn der ruhende Muskel zur Hebung einer Last erregt wird.

Die nächste Arbeit aus Fick's Laboratorium ist von Fritz Schenck und Gustav Brandt (30) und berichtet über die eingehenden Untersuchungen dieser Herren, um die Wärmeproduction superponirter Zuckungen klar zu legen. Sie haben nicht Veranlassung gefunden, an der Fick'schen Wärmemessungsmethodik etwas abzuändern.

In mancher Beziehung beachtenswerth ist eine Arbeit von Rudolf Metzner (31) aus dem Freiburger Laboratorium. Er benutzte eine Fick'sche Säule, verbunden mit einem Spiegelgalvanometer nach Thomson von Elliot Bross. Der Widerstand im Galvanometer war 2·17 ^{cm}. Die Empfindlichkeit reducirte er dadurch, dass er den Astatisirungsmagnet (180°) umkehrte, so dass dieser die Richtkraft des Erdmagnetismus auf das Nadelsystem unterstützte, anstatt entgegenzuwirken. Ein anderer beweglicher, unter dem Galvanometer angebrachter Magnet diente dazu, den Index (Spiegelbild) in das Gebiet der Scala zu bringen. Ein Scalentheil entsprach 0·000272 bis 0·001° C. Der Muskel war immer kälter als die freien Löthstellen der Säule, weil die Kammer nicht luftdicht geschlossen und also nicht ganz mit Feuchtigkeit gesättigt war.

Einfache Zuckungen gaben 1·5 bis 34 Scalentheile als Ausschlag. Einige Untersuchungen bezweckten, die Frage zu beantworten, ob die Natur des Reizes als Zeit- oder Momentreiz auf die Wärmeproduction einwirkte. Diese Frage wurde doch nicht völlig erledigt. Andere Versuche beabsichtigten das Verhältniss der Arbeit zur Wärme zu bestimmen, welches bei abnehmender Reizstärke zuzunehmen schien (Nawalichin), was aber nicht immer zutraf, wenn man nicht die von den elastischen Kräften verrichtete Arbeit abrechnete. Für maximale Zuckungen war das Verhältniss Arbeit : Wärme = 0·5 bis 1. Metzner sah den Muskel sich bei Dehnung erwärmen und bei Entlastung erkalten, und zwar letzteres in dem Maasse, dass die Abkühlung in einigen Zuckungen mit Entlastung die Zuckungswärme mehr

als decken konnte. Er sah auch die „negative Wärmeschwankung“ besonders in den Versuchen mit Zeitreizen und meint dies aus ungleicher Zusammenziehung der verschiedenen Muskelfibrillen, wodurch einige entlastet, also abgekühlt werden, erklären zu können.

Metzner fasst seine Ergebnisse so zusammen: „Die Wärmeproduction im Muskel ist keine eindeutige Function der äusserlich wahrnehmbaren mechanischen Verhältnisse der Thätigkeit.“ Uebrigens wird folgende beachtenswerthe Alternative aufgestellt: Sind Arbeit und Wärme Producte von zwei verschiedenen Processen im Muskel, oder arbeiten die einen Fasern des Muskels mit mehr, die anderen mit weniger Wärmeentwickelung?

In der nächsten Arbeit — von A. Fick (32) — wird als Resultat notirt: „Bei isometrischem Tetanus wächst alles Uebrige gleichgesetzt mit wachsender Reizstärke, der Stoffumsatz mehr als die Spannung. Bei isometrischem Tetanus ist zur Aufrechterhaltung eines bestimmten Spannungsgrades um so mehr Stoffumsatz erforderlich, je kürzer der Muskel ist.“ Dabei ist nun zu bemerken, dass hier die Länge des Muskels sich im Vordergrund als für den Stoffumsatz bei der Arbeit bestimmend hervordrängt. Vorher dachte man nie an die Länge, nur an die Spannung.

Die jüngsten aus Fick's Laboratorium auf diesem Gebiete hervorgegangenen Arbeiten von Fr. Schenck und Hermann Greife (33 und 34) nehmen wieder die Frage auf von der Muskelwärme bei isometrischen und isotonischen Zuckungen oder Tetanus und ihre Abhängigkeit von verschiedenen Temperaturen und Reizstärken.

Eine in experimentalkritischer Hinsicht sehr schätzenswerthe Arbeit, freilich nicht dem Gebiete der Muskelphysik angehörend, aber dem nächststehenden, der Nervenphysik, muss hier auch Erwähnung finden. Wie die Metzner'sche kommt auch diese aus dem Freiburger Laboratorium, wo sie von M. Cremer (35) mit denselben technischen Hülfsmitteln, welche Metzner brauchte, ausgeführt wurde. Die Empfindlichkeit der Aufstellung wurde doch viel höher eingestellt, in einigen Versuchen so hoch, dass man 0·00001° C. ablesen konnte. Das Ergebniss der Untersuchungen, dass die Wirksamkeit der Nerven nicht mit sichtbarer Erwärmung verbunden sei, hat ja ein grosses theoretisches Interesse.

Und für das Studium der Muskelwärme ist das Vorhandensein einer Menge Vorsichtsmaassregeln, welche hierher gehörige Versuche erfordern, von ungemein grosser Bedeutung.

Endlich bleibt nur noch übrig, eine neue Arbeit von Chauveau (36) zu erwähnen, in welcher er über seine Versuche, die in Helmholtz'

und Fick's Laboratorien auf dem vorliegenken Gebiete ausgeführten Arbeiten nachzumachen, berichtet. Er benutzte eine zweigliedrige Thermonadel aus Eisen — Neusilber—Eisen —, welche durch die zwei Gastrocnemiusmuskeln eines Frosches gesteckt wurden, so dass die beiden Löthstellen je in ihrem Muskel lagen. Die beiden Enden der Nadel wurden rechtwinklig umgebogen und in Quecksilbernäpfchen eingetaucht, die im Galvanometerkreise standen. Von der Empfindlichkeit der Aufstellung kann man möglicher Weise daraus urtheilen, dass, wenn er den einen Muskel zwei Secunden lang tetanisirte, er solche Ausschläge bekam, dass die wenigen, als Beispiele angeführten Durchschnittszahlen sich zwischen 4 und 19 Scalentheilen halten. Sie kann also nicht besonders hoch gewesen sein. Was er mit seinen Versuchen beabsichtigte, ist nicht ganz einleuchtend; vielleicht hängt das zusammen mit den Schwierigkeiten, welche die Technik geboten hat. Davon schreibt Chauveau: „Les résultats furent des plus intéressants, mais extraordinairement irreguliers et dissemblables".

Aus dem, was ich hier referirt habe, ist zu ersehen, dass die principiell verschiedenen Methoden eigentlich ganz wenige sind. Man hat wohl auch bolometrische Einrichtungen für das Studium der Muskelwärme empfohlen, aber Niemand hat, so viel ich weiss, dergleichen Untersuchungen ernstlich durchgeführt, noch weniger publicirt. Den Grund dazu glaube ich während meiner experimentellen Untersuchungen gefunden zu haben und dürfte im Folgenden Veranlassung finden, diese Frage nochmals zu berühren.

Was nun die ziemlich variirenden Ergebnisse betrifft, ist es klar, dass ein Theil der Verschiedenheiten dadurch bedingt waren, dass die angewandten Methoden fehlerhaft oder unzweckmässig und für die vorliegenden Aufgaben ungenügend waren. In anderen Fällen dagegen haben auch die besten Methoden wenig übereinstimmende Ergebnisse geliefert, was man zum Theil einer Unähnlichkeit der Functionsart der verschiedenen Muskeln zuschreiben muss. Ausserdem waren wohl auch andere Gründe vorhanden.

Eigene Versuche.

Untersuchungsmethoden.

Es sind zwanzig Jahre her, dass ich meine ersten Untersuchungen über Muskelwärme ausführte. Diese Arbeit wurde in Fick's Laboratorium in Würzburg, und natürlich hauptsächlich mit Benutzung der Technik gemacht, die Fick früher für solche Untersuchungen ausgearbeitet hatte. Die Ergebnisse meiner Versuche wurden im Früh-

jahr 1881 publicirt (20). Seitdem habe ich über hierher gehörende Fragen nichts geschrieben,[1] obwohl ich während der dazwischenliegenden Jahre fleissig damit beschäftigt war. Hauptsächlich gingen meine Bestrebungen dahin, möglichst befriedigende Untersuchungsmethoden zu schaffen, da ich überzeugt war, dass, wenn einmal eine wirklich gute Methode zur Verfügung stehe, die Lösung der jetzt scheinbar so verwickelten Probleme von sich selbst kommen sollte, wie eine reife Frucht vom Baume fällt.

Die zu überwindenden Schwierigkeiten waren doch grosse und mannigfache. Oft glaubte ich mich dem Ziele nahe, fand aber bei genauerer Prüfung, dass noch nicht Alles in Ordnung war. Unmuthig und verzagt habe ich mehrmals die ganze Arbeit hingelegt, mit dem Vorsatze, nie mehr Zeit daran zu verschwenden. Aber nach wenigen Wochen oder Monaten nahm ich die Arbeit da wieder auf, wo ich das letzte Mal stehen geblieben, oder an einem neuen Ausgangspunkte, welcher mir dann mehr zu versprechen schien.

Es ist kein Zweifel, dass ich, wenn ich mehr methodisch vorgegangen wäre, schneller zu einem glücklichen Erfolge gekommen sein würde. Dies aber, was jetzt so klar dasteht, war früher gar nicht so leicht zu durchschauen und vorauszusehen, weil die Schwächen und Fehler welche der schon existirenden Methode anhafteten, keineswegs weder von mir, noch von Anderen eingesehen waren, und es war erst bei der Prüfung der Methodik und der versuchten Verbesserungen, als es mir nach und nach klar wurde, was man Alles anzustreben, zu vermeiden und zu verhüten hatte, um zuverlässige Ergebnisse zu bekommen.

Im vorigen Kapitel wurde hier und da erwähnt, dass einige Verfasser ihre Erfahrungen in Hinsicht auf die Misslichkeiten der Untersuchungen zum Ausdruck bringen. Andere haben kein Wort daran gespendet; ein Blick aber auf die Versuchsprotokolle wird oft genug dem kritischen und kundigen Leser zeigen, dass nicht Alles in Ordnung war, dass die Ergebnisse der publicirten, vielleicht „ausgelesenen“ oder „gelungenen Versuche“ durchaus nicht immer die Einstimmigkeit und Eindeutigkeit aufzeigen, welche für wirkliche und genügende Beweisführung nöthig ist. Vor Allem sind es Controlversuche, welche so oft vermisst werden.

Das letztere sah ich schon während der Ausführung meiner Arbeit in Würzburg ein. Deshalb verbrauchte ich auch dort die meiste Zeit mit controlirenden Versuchen, theils über den Einfluss des Feuchtigkeitsgrades der Muskelkammer auf die Grösse der Ausschläge, theils

[1] Bis 1899 und 1900, wo die schwedische Ausgabe dieser Arbeit erschien

über die Dehnungswärme der Muskeln. Beide Fragen waren früher von Westermann besonders untersucht, dessen Arbeiten durch die Experimentalphysik, die darin einhergeht, ihren grössten Werth hat.

Hier einen vollständigen Bericht über alle die Versuche, welche ich gemacht habe, um bessere Methoden aufzusuchen, wäre nicht angemessen. Ich will aber auch nicht stillschweigend die ganze Entwickelungsskette übergehen, welche allmählich zu den Formen geführt hat, in welchen meine Methodik sich jetzt bewegt, und ich muss hier schon hervorheben, was die Erfahrung mich gelehrt, dass ich wohl nicht immer bei diesen Formen werde stehen bleiben, obwohl ich sie für jetzt sehr genügend finde.

Die Methoden, welche ich versucht habe, können füglich eingetheilt werden 1. in luftcalorimetrische, 2. bolometrische, 3. thermoelektrische Methoden.

Die luftcalorimetrische Methode.

Es war meinerseits gar nicht die Rede davon, den Luftbehälter des Thermometers zwischen den Muskeln einzuführen, wie es seinerseits Bunzen gethan hat, und wie es seitdem oft geschehen ist, wenn auch mit Quecksilber, anstatt Luft als thermometrischen Stoff. Ich habe im Gegentheil das Muskelpräparat in den Luftbehälter eingeführt.

Die besten Resultate bekam ich, wenn ich eine Art Differentialthermometer benutzte, der aus zwei durch eine Capillarröhre verbundenen und durch einen darin eingeführten, leicht beweglichen Flüssigkeitsindex abgetrennten Luftbehältern bestand. Die beiden Behälter waren aus Glas und hatten cylindrische Gestalt und luftdicht schliessende feste Deckel (siehe Tafel I, Figg. I und II. Sämmtliche Figuren dieser Tafel sind im Interesse der Deutlichkeit halbschematisch gehalten). In diesen Deckeln waren die zur Befestigung und Belastung der Muskeln und zur Einführung der reizenden elektrischen Ströme erforderlichen Einrichtungen angebracht. Um den Luftdruck ausgleichen zu können, waren kleine Löcher in die Deckel gebohrt, welche durch besondere Einrichtungen zu schliessen waren. Es ist selbstverständlich, dass so viele und grosse Muskeln eingeführt wurden, wie die Behälter gut halten konnten, ohne dass die Muskeln die Glaswände berührten; ebenso dass der ganze Apparat durch wärmeisolirende Hüllen genau geschützt war.

Nachdem man die zur Temperaturausgleichung erforderliche Zeit abgewartet hatte (1 bis 2 Stunden), wurden die Behälter von der Atmosphäre abgesperrt und die Bewegungen des Index mit Hülfe eines Mikroskopes unter schwacher Vergrösserung abgelesen.

Nach theoretischer Ueberlegung sollte man nun erwarten, dass ein solcher Apparat empfindlich genug wäre, um auch für einfache Muskelzuckungen ablesbare Wärmeausschläge zu geben. Das stimmt aber nicht mit meiner bis jetzt gemachten Erfahrung überein. Erst nach mehreren Zuckungen oder Tetanus hat der Index deuliche und messbare Ausschläge gezeigt. Woher das kommt — ob und wie dem abzuhelfen möglich ist, lasse ich hier bei Seite, da ich diese verhältnissmässig leichten Untersuchungen zur Schülerarbeit reservirt habe.

Die bolometrische Methode.

Mit bolometrischen Einrichtungen habe ich in mehreren Reprisen gearbeitet, und ein paar Mal glaubte ich auf diesem Wege an das Ziel gekommen. Der Bolometer ist auch kürzlich zum Studium der Muskelwärme warm empfohlen worden. Wie ich schon bemerkt habe, waren diese Empfehlungen nicht von erhärtenden Berichten über hierher gehörende Untersuchungen begleitet.

Auch meine bolometrischen Untersuchungen, die Muskelwärm betreffend, haben bei genauer Prüfung sich zuletzt als ganz belanglos gezeigt. Damit aber meine Mühe nicht ganz spur- und nutzlos gewesen sei, will ich erwähnen, warum diese für manche Untersuchungen so vorzügliche Methode nach meiner Erfahrung nicht für den fraglichen Zweck geeignet ist.

Es handelt sich um die Fehler dieser Methode und die Schwierigkeiten, jene Fehler unter gegebenen Versuchsbedingungen zu eliminiren. Man kann zwar ohne Zweifel die Empfindlichkeit der bolometrischen Aufstellung, so hoch man irgend wünschen will, in die Höhe treiben; es zeigt sich aber, dass, je mehr die Empfindlichkeit wächst, um so grösser und deutlicher die Fehler in den Versuchsergebnissen hervortreten.

Bei Anwendung dieser Methode auf myothermischem Gebiete haben wir Fehler zu befürchten sowohl von Seiten des Galvanometers und der Muskelkammer, als besonders von folgenden zwei für die calorimetrische Methode eigenen und unvermeidlichen Umständen: 1. Erwärmung des Muskels durch den Bolometerdraht, 2. Thermoströme von dem in der Bolometerbrücke einlaufenden, unumgänglichen Zusammenfügungen heterogener Metalle. Man könnte wohl meinen, dass man den in Punkt 1 genannten Uebelstand entgehen könnte, z. B. wenn man die Stromstärke und damit die Erwärmung des Bolometerdrahtes mässigte und also die Gefahr einer partiellen Erwärmung des Muskels verminderte, oder wenn man die Ströme nur für kurze

Zeit durch den Bolometer schlösse, da man freilich nicht allen Veränderungen der Temperatur des Muskels genau folgen, aber doch für gewisse Zeitmomente Temperaturanzeige bekommen könnte. Ebenso könnte man die Thermoströme durch dieselben schwachen oder kurzdauernden Ströme, durch Wärmeisolirung und geeignete Wahl des Materials u. s. w. zum Minimum reduciren. — Das ist alles richtig, aber immer wird ein kleiner Rest der genannten Fehler zurückbleiben und bei der grossen Steigerung der Empfindlichkeit, wie sie für die Messung der Muskelwärme gebraucht werden muss, steigt auch die Empfindlichkeit für diese Fehlerreste, welche die Ausschläge immer unzuverlässig, meistens ganz unbrauchbar machen.

Ich könnte zwar das nun Gesagte durch meine Versuchsprotokolle erhärten und veranschaulichen; damit kann ja aber nicht bewiesen werden, dass nicht mit Hülfe anderer Instrumente, Materialien oder Einrichtungen die erwähnten Fehler ganz zu vermeiden, und also alle Vortheile aus der in mancher Beziehung so vorzüglichen bolometrischen Methode zu ziehen wären. Deshalb will ich nur hinzufügen, dass ich die Einrichtungen, Aufstellungen u. s. w. bei meinen bolometrischen Versuchen vielfach variirt habe. Als Messinstrument diente meistens ein Thomson-Galvanometer von Elliot Bross, mit Concavspiegel für Projection. Die Bolometerdrähte wechselten betreffs des Materials Länge und Widerstand innerhalb der weitesten Grenzen, und der Widerstand im Galvanometerkreise kam immer dem der Bolometerkreise sehr nahe. Die Bolometerdrähte waren ausserhalb der Muskeln oder zwischen ihnen angebracht — in Berührung mit den Muskeln, oder durch ein Luftlager von ihnen geschieden u. s. w.

Die thermoelektrische Methode.

Endlich kommen wir an die thermoelektrische Methode, bei welcher ich zuletzt stehen geblieben bin. Ich habe geprüft, was Andere in diesen Jahren versucht oder vorgeschlagen haben; und zudem habe ich mir manche neue Einrichtungen gemacht. Eine nicht zu kleine Reihe Galvanometer habe ich erprobt, und noch mehrere Thermosäulen. Thomson's Galvanometer nannte ich schon; aber auch Rosenthal's Mikrogalvanometer, und zwar in mehreren Modificationen, habe ich gebraucht, ebenso d'Arsonval's Galvanometer in einigen Varianten. Meine ersten Versuche führte ich mit Fick's Thermogalvanometer aus, und die nächsten mit einer dem physiologischen Laboratorium in Upsala gehörigen Wiedemann'schen Boussole.

Was die Thermosäulen betrifft, so waren der Variationen nicht

nur mehrere, sondern auch grosse. Die Zahl der Elemente wechselt zwischen einigen sechzig bis zwei herunter. Das Material war entweder die gewöhnliche Combination von Eisen und Neusilber und Wismuth und Antimon, oder auch ganz andere. So habe ich, um die Masse und Wärmecapacität herabzusetzen, falsches Blättergold und Blättersilber mit Stanniol verbunden. Die Wirkung kann ich nicht loben. Seit dem Jahre 1895 habe ich fast ausschliesslich die Combinationen Constantan—Eisen oder Constantan—Kupfer, oder Wismuth—Kupfer angewendet.

Constantan ist bekanntlich eine Legirung aus Nickel (40 Proc.) und Kupfer (60 Proc.), hat ein elektrisches Leitungsvermögen, welches doppelt so gross ist wie das des Quecksilbers, und ist vor Allem durch einen sehr minimalen Temperaturcoefficienten gekennzeichnet, weshalb er in Etalonen zur Messung elektrischer Widerstände vortheilhaft Anwendung findet. In dieser Beziehung ist er dem „Manganin“ ähnlich, welches doch viel besser leitet.

Constantan ist dem Manganin in noch einer Beziehung ähnlich, und zwar in thermoelektrischer. Eine Combination von Constantan oder Manganin mit Eisen hat eine bedeutende thermoelektromotorische Kraft. Ich habe 54 Mikrovolt für einen Grad Temperaturunterschied angegeben gesehen. In einem Probeelement aus Eisen—Constantan, welche ich in dieser Hinsicht untersuchte, sah ich diese Kraft 56·7 Mikrovolt erreichen, also eine Grösse derselben Ordnung, wie für die besten Wismuth—Antimon-Combinationen. Dabei haben Constantan und Manganin die vorzügliche Eigenschaft, sich etwa wie Messing ziehen, löthen und arbeiten zu lassen.

Wenn man Protokolle myothermischer Versuchsreihen durchmustert, findet man oft, dass der Muskel in nacheinander folgenden, unter scheinbar durch und durch gleichartigen Verhältnissen ausgeführten Zuckungen nicht so wenig abweichende Wärmeausschläge gegeben hat. Manchmal hat man die Ungleichmässigkeit der Ausschläge damit verhüllt, dass man Durchschnittszahlen einer Anzahl unter gleichen Bedingungen gewonnenen Ausschläge berechnet, oder man hat die, welche man unbequem fand, ganz einfach als „fehlerhaft“ weggelassen. Es ist aber sicher, dass ein solcher Unterschied der Wärmeausschläge, welche nicht aus wissentlich eingeführten ungleichen Versuchsbedingungen zu erklären sind, doch nicht einer Launenhaftigkeit der Arbeitsweise des Muskels zuzuschreiben ist. Die Veranlassung ist unzweifelhaft in der Verschiedenheit der Versuchsbedingungen zu suchen, wenn auch die Verschiedenheit nicht erkannt und beabsichtigt war. Die Natur dieser den Experimentatoren entgangenen Fehler spürt man

manchmal deutlich genug in den Protokollen, nachdem uns die Augen aufgegangen sind betreffs der mannigfachen Gefahren, welche bei diesen delikaten Versuchen von allen Seiten drohen.

Ich will hier mit einigen Worten meine Erfahrungen in dieser Beziehung berühren, woher man auch die Motive der Form der Methodik, zu welcher mich diese Erfahrungen nach und nach geleitet haben, herauslesen kann.

Einer der allergewöhnlichsten und gefährlichsten Fehler beruht auf unvollkommener Verschliessung und Anfeuchtung der Muskelkammer. Die nächste Folge ist, dass die Kammerluft nicht vollständig mit Feuchtigkeit gesättigt ist, und dass das Muskelpräparat also durch Wasserabdampfung unter die Temperatur der Kammerluft und Thermosäule abgekühlt wird. Ein Theil der Oberfläche des Präparates, welcher von der Säule gedeckt ist, wird dadurch vor Wasserverdampfung geschützt und bekommt ausserdem Wärme von der Säule. Dieser Theil wird deshalb, nachdem das Präparat eine Zeit lang in der Kammer verweilt hat, immer etwas wärmer als das übrige Präparat. Bei der kleinsten Verschiebung zwischen Muskel und Säule kommt also die letztere mit kälteren Muskeltheilen in Berührung und kann deshalb unter Umständen einen deutlichen Abkühlungsausschlag — „negative Schwankung“ — vor dem positiven, welcher der Zuckung sonst allein folgt, veranlassen. Ein anderes Mal bewirkt diese Verschiebung und vorübergehende Abkühlung der Säule nur eine Verzögerung und Verminderung des Wärmeausschlages.

Es ist aber einleuchtend, dass die Verschiebung zwischen Säule und Muskel in verschiedenen Zuckungen leicht etwas grösser oder kleiner werden kann, wozu mehrere Momente beitragen können. Davon rühren die Ungleichmässigkeiten der Wärmeausschläge sicherlich sehr oft her.

Die meisten Forscher dieses Gebietes hüllten auch die andere Seite der Thermosäule mit Muskelstücken oder mit feuchtem Fliesspapier und dergleichen ein, um so die Temperaturausgleichung zu beschleunigen und die Wartezeit zu verkürzen, damit sie die Reizversuche anfangen könnten, ehe die Muskeln gar zu lange in der Kammer verweilt hatten. Dagegen ist ja nichts einzuwenden. Sorgt man aber nicht dafür, dass die Luft der Muskelkammer mit Feuchtigkeit gesättigt bleibt, werden jedoch durch Verschiebung zwischen Säule und Muskel meistentheils Ausschläge erscheinen. Es ist nämlich nicht sehr wahrscheinlich, dass die Abkühlung der beiden Seiten der Säule in solchen Versuchen denselben Grad erreichen sollen, höchstens dann für eine ganz kleine Weile. Die Fehler werden wohl überhaupt kleiner,

aber nunmehr auch in ihrer Richtung wechselnd und deshalb launenhafter.

Es giebt zwei Wege, den jetzt erwähnten zusammenwirkenden Fehlerquellen zu entgehen: den einen, die Muskelkammer gut umschlossen und angefeuchtet zu halten, den anderen, die Verschiebung zwischen Muskel und Säule zu verhüten. Weder Heidenhain's, noch Fick's Methode erfüllen in dieser Beziehung diese berechtigten Ansprüche. Dagegen waren Helmholtz' Thermonadeln diesbezüglich untadelhaft. Sie dürfen aber in anderen Beziehungen nicht einwandsfrei dastehen.

Alle die nun genannten Säulen waren eingerichtet, um die Bewegungen der Muskeln zum Theil mitzumachen. Man darf aber nicht ungestraft einen Theil eines Thermokreises bewegen. Bei den kleinen Widerständen, die hier vorkommen, und bei der grossen Empfindlichkeit der Aufstellungen ist der inducirende Einfluss des Erdmagnetismus auf einen solchen beweglichen Theil Veranlassung genug, um einen Ausschlag des Galvanometers zu geben. Ich hatte lange und oft mit solchen Ausschlägen zu kämpfen, ehe ich schliesslich ins Reine damit kam. Im Laufe einer Untersuchung beobachtete ich zufälliger Weise einen Ausschlag nach Verrückung eines Leitungsdrahtes, und nun experimentirte und speculirte ich darüber, bis ich endlich von einem kundigen Physiker, den ich zu Rathe zog, Auskunft bekam über den recht einfachen Grund solcher Ausschläge. Ich machte mir später diese Inductionsströme zu Nutze in der Weise, dass ich eine Schlinge des Leitungsdrahtes um den Umkreis einer runden, horizontalen Scheibe legte und mit der Scheibe 180° um eine horizontale Axe drehte, wobei ich Galvanometerausschläge bekam, deren Grösse von der Horizontalcomponente des Erdmagnetismus, von dem Durchmesser der Schlinge, dem Empfindlichkeitscoefficienten des Galvanometers und dem Widerstande abhängt. Damals brauchte ich Thomson's Galvanometer und regulirte seine Empfindlichkeit mit Hülfe des Richtmagnets, und gleichzeitig prüfte ich diese Empfindlichkeit und die gebührende (widerstandslose) Zusammenfügung der Leitung vermittelst dieser Scheibe (Erdmagnetinductor). Die Scheibe war 20 ^{cm} im Durchmesser und bei dem Empfindlichkeitsgrade, womit ich gewöhnlich arbeitete, gab die Umdrehung der Scheibe einen Ausschlag von 10 ^{cm}, gesetzt, dass kein zufälliger Leitungswiderstand bei Zusammenfügung des Thermokreises entstanden war. Der Scalenabstand war 1 ^{m}.

Man könnte nun meinen, dass die geringfügigen Bewegungen einer kleinen Thermosäule nicht zu vergleichen wären mit den umfangreichen Bewegungen der weit grösseren Drahtschlinge. Wenn wir

aber mit in Berechnung ziehen, dass bei dieser Aufstellung die gewöhnliche Grösse der Wärmeausschläge innerhalb der Grenzen von zwei bis zwanzig Millimeter wechselte, und einräumen, dass wenigstens ein oder ein paar Millimeter Ausschlag leicht von den Bewegungen der Thermosäule herkommen können, so wird dies gewiss nicht bedeutungslos für die Resultate sich zeigen.

Je kleiner die Säule und deren Bewegungen und je grösser der Widerstand des Thermokreises, um so weniger hat man den Einfluss der erdmagnetischen Inductionsströme zu befürchten. Am sichersten ist es jedenfalls, die Säule und die ganze thermoelektrische Leitung unbeweglich befestigt zu halten.

Es giebt überdies noch einen Grund, welcher dafür spricht. Es ist nämlich vielfach beobachtet worden, dass eine Biegung, Dehnung oder Pressung der Drähte eines Galvanometerkreises besonders in der Nähe einer Fügung oder Löthung genügt, um die Galvanometernadel in Bewegung zu versetzen. Die Sache ist schon längst allbekannt und braucht hier nicht weiter besprochen zu werden.

Die von Fick, Chauveau u. A. angewandte Methode, die bewegliche Säule in die Galvanometerleitung einzufügen, nämlich vermittelst quecksilberhaltigen Gefässen, in welchen die Leitungsdrähte und die freien Enden der Säule eintauchten, scheint mir gar nicht empfehlenswerth. Ein solcher thermoelektrischer Kreis ist ja selten stromlos. Es ist klar, dass unter solchen Umständen jede Veränderung des Leitungswiderstandes einen Galvanometerausschlag veranlassen soll, und wie leicht wird nicht der Widerstand des Quecksilbercontacts durch die Bewegung der Drähte geändert? Die Gefahr ist um so grösser, als hier gewöhnlich mit sehr kleinen Widerständen im Leitungskreise gearbeitet wird.

Bisweilen spürt man in den Versuchsprotokollen ungenügende Isolirung zwischen Thermoleitung und Reizbogen, oder auch Inductionswirkung der Reizströme auf den Thermokreis oder die Galvanometernadel. Das sind Fehler, die sich scheinbar leicht beseitigen lassen. Aber auch in dieser Beziehung hat die Erfahrung gelehrt, dass die Gefahr oft daher kommt, von wo man sie am wenigsten erwartet. Der gefährlichste Punkt ist da, wo der Muskel die Thermosäule berührt. Durch den Muskel geht nämlich bei directer Reizung der Reizstrom. Die Säule muss deswegen vom Muskel elektrisch isolirt sein. Dazu verwendet man gewöhnlich einen dünnen Lack- oder Firnissüberzug, eine Kautschukmembran oder dergleichen. Gut angebracht hat eine solche Isolirung sich als völlig hinreichend erwiesen. Aber man darf sich nicht zu lange darauf verlassen. Keiner von den Lacken, die ich

geprüft habe, widersteht auf die Dauer die Feuchtigkeit der Kammer und des Muskels. Die Vorsicht gebietet, wenigstens jeden zweiten Versuchstag den Lacküberzug zu erneuern und immer nach beendeten Tagesversuchen zu untersuchen, ob die Reizströme auf den Galvanometer wirken. Wie man sich gegen die Inductionswirkungen schützt, habe ich hier nicht nöthig weiter auszulegen.

Registrirt man graphisch die Galvanometeroscillationen, so kann man kaum entgehen, Fehler, welche von einer der letzterwähnten Veranlassungen herrühren, zu bemerken. Begnügt man sich aber, wie alle früheren Untersucher, damit, die (ersten) Wendepunkte der Oscillationen abzulesen und zu notiren, da werden solche Fehler leicht unbeachtet gelassen.

Eine Menge anderer Fehler, als die hier besonders angezeigten, sind natürlich denkbar und auch ohne Zweifel vorgekommen. Die erwähnten sind aber die häufigsten und die, welche öfters unbeachtet blieben oder in ihrer Bedeutung unterschätzt wurden.

Ehe ich diese wichtige Frage ganz bei Seite lasse, erachte ich es für nöthig, in Folge einer theuer erworbenen Erfahrung noch einige Sachen hervorzuheben. Die eine ist: dass jede Fügung oder Verbindung im Thermokreise ausserhalb der Säule eine Gefahr der Entstehung störender Thermoströme, welche irreführend werden können, mit sich bringt. Am besten ist es deshalb, die Glieder und Verbindungen der Thermoleitung auf das geringste Maass zu beschränken und am liebsten die ganze Leitung möglichst kurz und zusammengedrängt zu machen.

Die andere Sache ist, dass es, wenn man Galvanometer verwendet, deren Nullpunkt unter dem Einflusse erdmagnetischer Variationen wechseln, sehr nützlich ist, sich im Voraus mit den dadurch bedingten Magnetschwingungen sowohl in offenem, wie in geschlossenem Kreise gut vertraut zu machen. Dadurch wird man vor mancher Ueberraschung und Täuschung verschont, und das Beste wird es jedenfalls sein, wenn man vermeiden kann, solche Galvanometer zu brauchen, oder wenigstens ihre Abhängigkeit vom Erdmagnetismus zu einem Minimum reduciren kann.

Ich gehe nun zur Beschreibung der Methoden über, welche mir die besten Resultate gegeben haben.

A. Gemeinsam für Alle ist, dass die Säule fix und nur eingliedrig war, aus Eisen—Constantan, Kupfer—Constantan oder Kupfer—Wismuth bestehend.

Ein paar Jahre arbeitete ich mit einem Elemente, welches aus einem 2 ^{cm} langen, 2 ^{mm} starken Constantandrahte bestand, dessen beide

Enden mit Eisendrähten zusammengelöthet waren; diese Drähte wachsen schnell in der Stärke an und bilden zusammen mit dem Constantandrahte einen horizontalen Stab, welcher mit seinen Enden in vertikalen, durch die Decke der Muskelkammer gehenden und dort gut befestigten Kupferstäben fixirt ist. Das Element hat grosse Aehnlichkeit mit dem Taf. I Fig. *E* gezeichneten, welche Zeichnung dazu dienen kann, auch diese Beschreibung zu erläutern. Auf den Löthstellen wird nun das Muskelpräparat rittlings gehängt, die zwei Adductoren mit der Symphyse auf dem runden Stab ruhend, die Gastrocnemiusmuskeln auf entsprechende Weise, nachdem ihre oberen Enden fest und dicht zusammengebunden waren. Die Adductoren umschliessen so die Löthung an zwei Seiten, ohne dass eine nennenswerthe Verschiebung oder Dehnung der Muskeln hier stattfindet. In Folge der Gestalt der Gastrocnemien können diese bei derselben Fixirungsweise sich den Löthstellen nicht so genau anschmiegen. Werden sie aber höher an einer besonderen Einrichtung befestigt, so dass die Muskelbäuche die Löthstelle berühren, so entstehen bei jeder Bewegung der Muskeln Verschiebungen, welche die Resultate schwer compromittiren können. Daraus folgt, dass die Gastrocnemien sich nicht so gut eignen, um mit diesen Elementen die Muskelwärme zu studiren, wie die Adductoren.

Die herabhängenden Muskelenden werden auch zusammengebunden, und zwar mit Kupferdrähten, welche durch Löcher im Boden der Kammer weiter geführt werden und dazu dienen, die Verbindung mit etwaiger Registrireinrichtung und Belastung zu vermitteln und die Reizströme zu den Muskeln zu leiten. Die Ableitung dieser Ströme besorgen besondere, durch die Decke der Kammer zu führende Metallstäbe, welche zugleich die Symphyse von oben gegen das Element festdrücken.

Die Kammerwände sind aus Kupfer oder Messing, inwendig überall mit feuchtem Fliesspapier ausgekleidet und auswendig mit mehreren wärmeisolirenden Lagen aus Flanell umgehüllt. Der Kammerboden ist aus Ebonit, gegen die Mitte ein wenig ausgehöhlt und mit ein paar Tropfen Oel benetzt, welches die feinen Löcher, durch welche die Kupferdrähte gehen, immer verschliessen.[1] Ein Bajonettverschluss verbindet die cylindrische Wand der Kammer mit der Decke, und die Dichtigkeit wird auch hier durch eine Oellage gesichert. Von der Kammer gehen gut isolirte Leitungsdrähte durch eine Papprőhre zu dem auf einer Wandconsole stehenden Thomson's Galvanometer.

[1] Es ist gewiss nicht meine Absicht, Herrn Dr. Bürker seine Priorität bezüglich dieser wahrscheinlich oft gebrauchten Finte zu bestreiten, aber es giebt auch keinen Grund, zu verhehlen, dass ich sie seit lange her brauchte.

Dieser steht in einem wattirten Holzkasten, welcher dem Spiegel gegenüber ein Loch hat, das aber mit einer planen Glasscheibe verdeckt ist. Die Thermorollen sind neben einander geschaltet und haben zusammen einen Widerstand von 0·068 Ohm; der Widerstand der Leitung nebst Thermoelemente ist 0·067 Ohm, also des ganzen Kreises 0·137 Ohm.

An derselben Console, welche den Galvanometer trägt, ist auch ein horizontaler Arm fixirt, der eine elektrische Glühlampe und darunter die Scala hält. Diese ist auf mattirtes Glas gemalt und vor störendem Licht dadurch geschützt, dass sie tief in einem dreieckigen, schwarzen Pappkasten eingebracht ist und zugleich die Hinterwand des Kastens bildet, während die Spitze des Kastens dem Galvanometer zugekehrt ist. Die Spitze selbst ist übrigens weggeschnitten, und durch das so entstandene Loch gehen die von dem Galvanometerspiegel reflectirten Strahlen vor fremdem Lichte ziemlich rein zur Scala hinein. Vor der Scala sitzt der Experimentator und achtet auf die Bewegungen des Reflexes. An seiner Seite steht die Muskelkammer mit den dazugehörenden Einrichtungen, um den Muskel zu reizen und seine Bewegungen aufzuschreiben. Unter der Scala steht ein Registrircylinder mit horizontal liegender Trommel und vor dieser ein Marey'scher Schlittenapparat. An dem Schlitten sind angebracht theils ein Stab mit einer Spitze, die vor der Scala spielt, theils eine Feder, mit welcher die Verschiebungen des Schlittens an der Trommel geschrieben werden. Der Zweck dieser Einrichtungen ist, die Oscillationen der Galvanometernadel graphisch wiederzugeben und zu bewahren, was auch vorzüglich gelingt. Man hat nur den Schlitten mit der Schraube des Schlittenapparates oder unmittelbar mit der Hand zu führen, indem man dafür sorgt, dass die genannte Spitze immer den Wanderungen des Lichtreflexes genau folgt.

Nach beendeter Versuchsreihe hat man in der aufgeschriebenen Curve ein zuverlässiges Document, welches überdies unter günstigen Umständen wenig zu wünschen übrig lässt, die Uebersichtlichkeit der Ergebnisse betreffend, und unter allen Umständen eine schätzenswerthe Anleitung zum Verständnisse der Natur und Bedeutung der Ausschläge abgiebt.

Aber diese Curven enthüllen dabei auch die schwache Seite der Methode. Diese ist von der unbeständigen Lage des Nullpunktes bedingt, welche oft, wie es scheinen kann, ganz willkürliche Wanderungen der Magnetnadel veranlasst und meistens der Abscisse einen nichts weniger als geraden, geschweige denn einen horizontalen Verlauf giebt. An windigen Tagen, wovon wir hier gar zu viele haben, wird

deswegen die Methode fast unbrauchbar, und nur bei völliger Windstille kann man darauf rechnen, eine längere, gleichmässig verlaufende Abscisse zu bekommen, von welcher dann die Wärmeausschläge mit unverzerrter und gesetzmässiger Biegung zu der dem Temperaturzuwachs des Muskels entsprechenden Höhe sich erheben. Meistentheils muss man von Zeit zu Zeit mittels des Richtungsmagnetes den Index zur Mitte der Scala zurückführen, um die Curve innerhalb der Ränder der Trommel schreiben zu können.

Indem ich die Schwäche der Methode andeutete, gab ich auch den Grund an, warum ich mich nach anderen Methoden umgesehen habe. Im Folgenden werde ich die jetzt beschriebene Aufstellung A nennen.

B. Vor einigen Jahren hat Herr Broca vorgeschlagen, das astatische Nadelsystem zu Thomson's und dergleichen Galvanometer nach einem neuen Typus zu machen, welcher starke magnetische Wirkungen mit geringem Trägheitsmomente vereinen sollte. Das Magnetsystem ist aus zwei möglichst gleichen parallelen und vertikalen, geraden Stahldrähten gemacht, welche ganz nahe verbunden und auf eine eigenthümliche Weise magnetisirt worden sind. Dies wird so gemacht, dass die Mitte einer Nadel an den einen Pol eines kräftigen Elektromagnetes gelegt wird, wobei sich drei Pole bilden, einer in der Mitte der Nadel, und einer an jedem Ende, von welchen der erste genau so stark ist, wie die zwei letzten zusammen genommen. Die andere Nadel wird in derselben Weise magnetisirt, aber mit dem anderen Pole des Elektromagnetes. Das Nadelsystem nebst Spiegel wird an einem Quarzfaden aufgehängt und zeigt sich dann, wenn gut gemacht, ziemlich astatisch. Seltener dürfte man aber vollständige Astasie so ohne Weiteres erreichen. Verlangt man vollständige Unabhängigkeit von dem Erdmagnetismus und seinen Veränderungen, so wird es wohl meistens nöthig, eine kleine Nadelcorrection einzuführen, welche mit Geduld und unter methodischem Verfahren sich gut machen lässt. Ich führte die Correction so aus, dass ich ein ausprobirtes Stück eines feinen, weichen Eisendrahtes an das untere Ende des Nadelsystems legte, wo es vom Magnetismus festgehalten wurde.

Ein solches, nicht vollständig astatisches System habe ich in einem kleinen tragbaren Galvanometer, mit welchem ich nicht nur Muskel- und Nervenströme, sondern auch Thermoströme, von der Muskelwärme in der sub A beschriebenen Thermosäule entstanden, meinem Auditorium demonstrirt habe. Das System hängt an einem Quarzfaden, dessen Richtkraft von einem festen Magnete unterstützt wird, um so die Nulllage zu stabilisiren, natürlich nicht ohne etwas von der

Empfindlichkeit zu opfern. Zu beiden Seiten der Doppelnadel sitzen die zwei kleinen Drahtrollen in einem gemeinsamen Ringe, welcher obenan die Laterne für den Spiegel und darüber die Röhre für den Quarzfaden mit Befestigung, unten einen kleinen Fuss trägt; dieser ruht auf einer Marmorplatte mit Stellschrauben und der Einrichtung, die Rollen neben oder nach einander zu verbinden. Die Rollen können leicht gewechselt und, da sie mit Bajonettverschluss im Ringe befestigt sind, gleichzeitig in die Leitung eingefügt werden. Das kleine, niedliche und dabei sehr empfindliche Instrument, das mir beim Unterricht grossen Nutzen gebracht hat, ist leicht aufzustellen und bequem zu gebrauchen, wenn man nur gebührende Rücksicht auf die Zerbrechlichkeit des Quarzfadens nimmt. Ein Coconfaden wäre wohl manchmal vorzuziehen. So lange das Nadelsystem nicht ganz astatisch ist, leidet das Instrument principiell an demselben Fehler, wie der Thomson'sche Galvanometer.

C. Der d'Arsonval'sche Galvanometer eignet sich in den Formen, die ich bis jetzt gesehen habe, nicht gut zur Einschaltung in eine thermoelektrische Leitungskette. Es ist die Zuleitung zu der beweglichen Spule, welche hier die Schwierigkeit verursacht, weil sie kleinen elektrischen Leitungswiderstand und zugleich kleinen mechanischen Widerstand gegen die Bewegungen der Spule darbieten müsste. Die Sache wird aber einfach genug, wenn man darauf verzichtet, die Ströme von aussen zur Spule zu leiten, und anstatt dessen das Thermoelement mit in die Spule eingehen lässt und ihm nur durch Strahlung Wärme zuführt. Nach einigen misslungenen Versuchen gelang es mir auf diese Weise, ein in gewisser Beziehung sehr hervorragendes und interessantes Instrument zu schaffen.

Das magnetische Feld ist von fünf kräftigen permanenten Hufeisenmagneten mit gemeinsamen Polschuhen und einem zwischen diesen gelegenen Eisencylinder hergestellt. In dem kreisförmigen Raume zwischen Polschuhen und Eisencylinder bewegt sich ein geschlossener Bügel (Taf. I Fig. *C*), welcher grösstentheils aus einem Kupferbändchen hergestellt ist, unten aber eine herabgehende Partie hat, deren einen Theil ein 3 ^{cm} langer und 1 ^{mm} dicker Constantandraht ausmacht. Am Bügel war oben ein kleiner Spiegel angebracht und das Ganze hing an einem Quarzfaden. An der untersten Spitze war also eine Löthstelle zwischen Kupfer und Constantan. Diese Spitze war von einer dünnen Kupferhülse, in Gestalt und Grösse etwa wie ein Zündhütchen, in welchem die Spitze sich frei drehen konnte, umgeben. Die Hülse war, etwas in die Muskelkammer versenkt, an deren Decke befestigt. Die Muskeln wurden nun so um diese Hülse gelegt, dass sie diese

allerseits berührten und ihr ihre Wärme mittheilten. Davon strahlte die Wärme auf die Löthstelle und rief Thermoströme im Bügel hervor, welche dann drehend auf Bügel und Spiegel wirkten. Diese Drehbewegungen wurden, wie bei Aufstellung A, aufgeschrieben.

Die Empfindlichkeit kann hier fast unbeschränkt gesteigert werden. Sie hängt wesentlich von der Intensität des magnetischen Feldes, dem elektrischen Leitungsvermögen des Bügels, der Schwere der Equipage und den Dimensionen und der darauf beruhenden Richtkraft des Quarzfadens ab. Auch ist die Empfindlichkeit des hier gebauten Instrumentes sehr bedeutend. Sie enthüllt die Joule'sche Wärme in todten Muskeln, welche von einfachen Inductionsstromstössen durchströmt werden, solchen, wie ich sie Tags vorher zur Reizung derselben Muskeln anwendete. Die Grösse der Ausschläge wechselt mit der Intensität der benutzten Inductionströme unbegrenzt. Aber auch mit diesem Apparate ist es nicht möglich, eine Wärmeentwickelung der Nerven bei der Reizung zu spüren.

Ungeachtet der Vorzüge der bedeutenden Empfindlichkeit und doch vollständige Unempfindlichkeit für magnetische und elektrische Störungen, wird der Gebrauch dieses Instrumentes in der hier beschriebenen Gestalt ziemlich beschränkt. Einige der Uebelstände könnten wohl durch gewisse Veränderungen der Constructionsdetails vermindert, wenn nicht ganz entfernt werden; andere sind wohl unvermeidlich. Zu diesen rechne ich seine in Folge der kräftigen Dämpfung und der geringen Richtkraft langsamen Bewegungen, zu jenen seine stetigen Wanderungen, eine Wirkung der Langsamkeit, mit welcher die Eisenmassen den Temperaturwechselungen der umgebenden Luft folgen. Die eine Löthstelle liegt ja diesen Eisenmassen näher als die andere. Vielfache Hüllen aus Kupfer und wärmeisolirenden Stoffen könnten diese Unruhe nur unvollständig beseitigen.

D. Ein zweites Exemplar wurde deshalb gemacht, wo folgende Modificationen eingeführt waren: der Raum zwischen den Polschuhen wurde bedeutend vermindert, der Eisencylinder fortgelassen und der Kupferbügel ganz eng gemacht — nur ein paar Millimeter zwischen die beiden vertikalen Schenkel, die aus runden Kupferdrähten gemacht waren (Taf. I Fig. *D*). Weiter waren diese Schenkel gleich lang, deren untere Enden dünn gemacht und mit einem Stück Constantandraht zusammengelöthet, während eine zwischengeschobene Ebonitlamelle die Ueberführung der Wärme durch Strahlung abschirmte. Damit war ein ganz symmetrisch gebautes Differentialelektrothermoskop hergestellt, welches mit seinen Ausschlägen zeigte, von welcher Seite die grösste Wärmestrahlung stattfand.

Um die Empfindlichkeit zu vermehren, war das untere Ende mit den beiden Löthungen berusst. Sie war in einem kleinen Kämmerchen untergebracht, dessen Wände theils aus wärmeisolirendem Stoffe (Celluloid), theils aus zwei dünnen, ebenen Kupferplatten hergestellt waren. Ausserhalb und in Berührung mit je einer dieser Kupferplatten hängen nun zwei Muskeln, von der feuchten Muskelkammer umschlossen.

Dieser Apparat hat seines symmetrischen Baues zu Folge eine ziemlich ruhige Lage und zudem als Folge der geringeren Dämpfung und des kleinen Träghheitsmomentes etwas schnellere Bewegungen. Ich habe ihn aber zu wenig geprüft, um seine Verwendbarkeit völlig beurtheilen zu können. Die Verschiebungen zwischen Muskeln und Kupferplatten bei den Formveränderungen der ersteren bildet eine bei diesen Apparaten unvermeidliche Fehlerquelle, welche mir ernste Bedenklichkeiten gegen seine Anwendung zu myothermischen Untersuchungen eingeflösst haben.

E. In den Aufstellungen *E* und *F* finden wir die Broca'sche Equipage wieder, aber nun völlig astatisirt — siehe Aufstellung *B* S. 85. Die Thermorollen sind stark modificirt worden. Die Länge der Leitung möglichst reducirt und das Thermoelement vereinfacht, indem das Eisen weggefallen ist und nur Kupfer und Constantan wie in Aufstellung *C* und *D* geblieben sind. Dadurch wird freilich die elektromotorische Kraft für jeden Temperaturunterschied mit etwa 20 Proc. vermindert, die gewonnenen Vortheile des verminderten Widerstandes und der beschränkten Anzahl Löthstellen müssen aber diesen Verlust gut decken.

Die Hängevorrichtung für den Quarzfaden ist an der Decke eines parallelepipedischen Glaskastens angebracht. Der Kasten ist unten offen und ruht auf einer starken Ebonitscheibe (Taf. I Fig. *E*, *10*). Diese Scheibe wird von zwei an der Bodenplatte befestigten Messingpfeilern getragen, und trägt selbst an der oberen Seite die Thermorollen, an der unteren Thermosäule und Muskelkammer. Die zwei erstgenannten sind aus einem Stück 2^{mm} langen Kupferdraht hergestellt. Dieser Draht ist von der Mitte aus zu zwei platten, senkrechten und parallelen Spiralen in 4·5 bezw. 5 Touren zusammengerollt worden und dienen nun diesen Spiralen als Thermorollen und lassen zwischen sich Platz für das Magnetsystem. Die übrig gebliebenen Enden des Drahtes gehen durch die Ebonitscheibe hindurch, werden rechtwinklig gegen einander gebogen und enden 2^{cm} von einander entfernt. Der Zwischenraum wurde von Constantandraht ausgefüllt, welcher an die Enden des Kupferdrahtes gelöthet wurde und den Kreis für immer schloss.

Die Muskelpräparate wurden, wie ich oben beschrieben habe, rittlings um die Löthstelle gelegt; aber damit kein Brechen oder keine Biegung hier entstehen kann, ruht der ganze horizontale Verbindungszweig auf einem dünnen, genügend breiten und gut isolirten Metallstreifen (12), welcher von einem Paar in die Ebonitscheibe eingeschraubten Messingstäbchen getragen wird.

Die Einrichtung der Muskelkammer ist die schon beschriebene. Weitere Details sind leicht aus Taf. I Fig. *E* zu ersehen. Hier kann man mit zwei Muskelpräparaten gleichzeitig oder abwechselnd arbeiten wie man es wünscht.

Um den Bewegungen des Spiegelindex zur Registrirung derselben folgen zu können, müssen sie gedämpft werden, weil sie sonst zu schnell sind. Darum wurde am Spiegel eine dazu geeignete Glimmerplatte angeklebt. Da der Spiegel dieses Instrumentes plan war, brauchte ich ein Ablesefernrohr, das natürlich nicht zu bewegen war. Dagegen war die Scala am Schlittenapparat angebracht und damit so verschoben, dass ihr Nullpunkt immer vom Fadenkreuz des Fernrohrs gedeckt wurde. Wünscht man nicht, die Ausschläge zu registriren, sondern nur die Wendepunkte zu verzeichnen, so lässt man lieber den Dämpfer fort und arbeitet mit frei oscillirender Equipage. Auch bei photographischer Registrirung der Oscillationen ist der ungedämpfte Magnet vorzuziehen.

F. Ein weiterer Fortschritt in der Technik ist durch eine kleine Abänderung des Thermoelementes gewonnen. Die beiden Endstücke des Kupferdrahtes sind verlängert worden und reichen nun ein Stück um einander und werden durch eine dünne Ebonitlamelle geschieden, zu Papierdicke verdünnt und mit einer oder zwei Nietungen aus $0 \cdot 5^{\mathrm{mm}}$ starkem Constantan- oder etwas stärkerem Wismuthdrahte durch die Ebonitlamelle hindurch zusammengenietet. Das Präparat reitet mit der Symphyse am Rande der Ebonitlamelle und die beiden Muskeln werden durch diese von einander getrennt. Unmittelbar unter dem oberen, horizontalen Rande der Ebonitlamelle, also so nahe wie möglich an der Symphyse, liegen nun die Löthungen. Wenn diese nur ein paar Millimeter von der Symphyse abstehen, werden die Verschiebungen der Muskeln die Ausschläge beeinflussen und die Resultate compromittiren.

Ein jeder Adductor berührt seine Löthstelle. In Folge der symmetrischen Anordnung und erleichterter Wärmeleitung durch den kurzen Constantan- bezw. Wismuthdraht einerseits und den starken, doch nicht so langen Kupferdraht andererseits vollzieht sich die Temperaturausgleichung sehr schnell, in wenigen Minuten. Die Aus-

schläge klingen deshalb auch sehr geschwind ab, so dass man die einzelnen Experimente (Zuckungen u. s. w.) in ziemlich kurzen Pausen auf einander folgen lassen kann, was ja immer angenehm ist. Das schnelle Abklingen der Ausschläge macht aber, dass man mit ungedämpftem Magnete arbeiten muss und dabei auch auf die Anwendung der oben beschriebenen graphischen Methode verzichten muss, da man die schnellen Bewegungen des Index nicht gut mit der Schreibfeder verfolgen kann. Hier ist auch die Controle, welche die graphische Aufzeichnung abgiebt, weniger von Nöthen. Ich habe deswegen hier mit ungedämpfter Magnetnadel gearbeitet und nur die Wendepunkte aufgeschrieben oder aufschreiben lassen. Die bewegliche Scala habe ich doch beibehalten und vor jedem Versuche ihren Nullpunkt in das Fadenkreuz eingestellt.

Die Empfindlichkeit dieses Apparates musste reducirt werden, was mit einem über der Magnetnadel in senkrechter Richtung verschiebbaren und um die vertikale Axe drehbaren Richtmagnete bewirkt wurde, und zwar so, dass die Schwingungszeit, welche ohne Richtmagnet nur von der Torsionselasticität des Quarzfadens abhing, 20 Sec. für eine Doppelschwingung betrug, nun zu 10 bis 3·5 Sec. herabsank. Eine einfache Zuckung giebt dann bei einem Scalenabstande von 110 ^{cm} Ausschläge, wo die erste Schwingung zu 0 bis 25 Scalentheilen (Millimeter), je nach den Umständen, hinabstieg. Ein Tetanus, 1 Secunde dauernd, gab Ausschläge, welche bis zu ein paar hundert Millimetern reichen könnten.

Wenn ich im Thermoelemente Wismuth anstatt Constantan brauchte, wurde die Empfindlichkeit nicht vermehrt, eher vermindert.

G. Eine nicht unwesentliche Verbesserung habe ich kürzlich eingeführt, indem ich auch die Thermorollen oder Spiralen in der feuchten Kammer versenkt und somit die ganze Thermoleitung unter möglichst gleichen Temperaturverhältnissen gestellt habe. Es ist nämlich kein Zweifel, dass in früheren Apparaten ein Unterschied in dieser Beziehung bestanden hat, wie gut man auch für Wärmeisolirung gesorgt haben möge. Es hängt natürlich nicht davon ab, die Thermoleitung bei einer constanten Temperatur zu halten, sondern davon, dass die verschiedenen Theile der Thermoleitung immer gleich temperirt sind oder immer denselben Temperaturunterschied behalten.

In dieser Beziehung bieten die Anordnungen des Apparates *G* die weit grösseren Garantien. Ausser den Figurenerklärungen dürften einige Worte nothwendig sein, um eine klare Vorstellung von dem Bau des Instrumentes zu geben.

An der Bodenplatte 11 (Taf. II Fig. *G*), die zugleich den Boden

der feuchten Muskelkammer ausmacht, stehen zwei Messingsäulen, die mit dem Querbalken 13 und oben mit der Ebonitscheibe 10 verbunden sind. Auf dieser Scheibe steht die Spiegellaterne und darauf die Röhre mit der Aufhängeeinrichtung. Diese Scheibe hat in der Mitte ein kleines Loch, wo eine dünnwandige Röhre aus Celluloid (Film) steht und festgekittet ist. Die Röhre reicht bis an den Balken 13 herunter und ist hier genau geschlossen, so dass ihr Inneres von der feuchten Kammer abgeschlossen ist. Hier bewegt sich das Magnetsystem und ausserhalb der Röhre sind zu beiden Seiten die Spiralen und die Thermorollen. Deren beide Enden gehen durch den Balken 13 und sind darin befestigt, gehen ein Stück weiter herunter, wenden in horizontaler Richtung sich gegen einander, sind verdünnt und an je einer Seite der Celluloidlamelle 6 angelegt und mit einem Drahtstück (oder zwei) aus Constantan zusammengenietet worden. Ich habe es für zweckmässig befunden, die Theile der Thermoleitung, welche in Berührung mit den Muskeln kommen, dadurch zu isoliren, dass ich sie mit einer Lösung von Celluloid in Alkohol und Aether bepinselt habe. Die beim Trocknen der Lösung gebildete Haut haftet gut an dem blanken Kupfer, isolirt auch in dünnen Lagen genügend, ist sehr haltbar auch gegen die Feuchtigkeit und ist überaus leicht zu erneuern, wenn es nöthig wird.

Eine andere Verbesserung ist die, dass die cylindrische Aussenwand (Taf. II, 14) der Muskelkammer abzuheben ist und, nachdem innerhalb der Kammer Alles in Ordnung ist, herübergestellt werden kann und somit die Kammer verschliesst. Dabei steckt ein nach innen und dann nach unten hervorragender Falz dieser Wand in einer mit Oel gefüllten Rinne, welche in der oberen Ebonitscheibe (Taf. II, 10) ausgehöhlt ist, während der untere Rand in eine gleichfalls mit Oel gefüllte circuläre Rinne der Bodenscheibe (Taf. II, 11) eindringt. — Die dicken, wärmeisolirenden äusseren Hüllen und die innere, feuchte Auskleidung sind in der Figur nicht angedeutet, obschon bei den Experimenten natürlich immer vorhanden.

Ehe ich das Kapitel der Methodik abschliesse, habe ich noch Einiges über meine Reizvorrichtungen zu erzählen. Um gleich grosse Wärmeausschläge zu erhalten, sind ganz gleiche Reizungen ebenso nöthig, wie wenn man gleichen Zuckungen nachstrebt. Aber gleiche Reizungen sicher zu schaffen, war schon lange ein fast unerreichbares, sehr erstrebenswerthes Ziel. Wendet man maximale und noch stärkere Reize an, so gewahrt man ihre Ungleichmässigkeiten nicht so leicht; man will aber, um den Muskel und Nerv zu schonen,

nicht gern unnöthig starke Reize zuführen, und ausserdem hat man ja oft Veranlassung, mit untermaximalen Reizen zu arbeiten; und da ist der Muskel sehr empfindlich gegen Variationen. Es hat sich fast unmöglich gezeigt, sicher gleiche Oeffnungs- oder Schliessungsinductionsschläge zu erzeugen. Auch auf die Condensatorentladungen kann man sich nicht unter allen Umständen verlassen. Deshalb haben einige Forscher sich zu den elektromagnetischen Inductionsströmen gewendet und lassen, z. B. wie v. Kries, eine Metallscheibe mit eingefügten Eisenstücken zwischen den Polen zweier Elektromagnete votieren. Der eine Elekromagnet wird durch einen constanten Strom magnetisirt, während die in der Drahtrolle des anderen, jedes Mal ein Eisenstück passirt, inducirten Ströme zum Muskel oder Nerv geleitet werden.

Ich habe es bequemer und einfacher gefunden, die Ströme durch permanente Magnete zu induciren. Sie werden dabei auch von möglichen Wechselungen der Spannung des Stromerzeugers unabhängig, wodurch die Zuverlässigkeit des Apparates auch viel gewonnen hat. Der Apparat in seiner jetzigen Gestalt hat mehrere Entwickelungsphasen durchgemacht und ist nun in zwei für verschiedene Aufgaben geeignete Formen auskrystallisirt. Die eine Form, welche eine vielseitigere Anwendung zu genügen beansprucht, hat einen kräftigen Hufeisenmagnet mit zwei Polstücken aus weichem Eisen, welche mit ganz feinem isolirten Kupferdraht umwickelt sind (siehe Taf. I Fig. III). Zwischen den Polen ist ein Abstand von 15^{mm}. Der Magnet ist an einem Schlitten angebracht, welcher an meinem rotirenden Federmyographion zu befestigen und dabei mittels Schraube in der Richtung des Radius des Myographcylinders zu bewegen ist. An der Axe des Myographion ist nun anstatt des Cylinders eine runde Metallscheibe aufgesteckt, und am Rande dieser Scheibe können 12^{mm} dicke cylindrische Eisennägel radiär eingeschraubt werden, welche bei Drehung der Scheibe, zwischen den Magnetpolen vorübergehend, für einen Augenblick die magnetischen Kraftlinien sammeln und eine doppeltphasige Stromschwingung in den Drahtwindungen induciren. Dank dem zuverlässigen Laufe des Federmyographions werden diese Ströme einander völlig gleich für dieselbe Lage des Magnetes und Widerstandes der Leitung. Die nöthigen Veränderungen der Reizstärke bewirkt man am liebsten durch Verschiebung des Magnetes. Freilich kann man auch durch Veränderung der Umlaufszeit des Federmyographions die inducirende Wirkung modificiren, dabei ändert man aber auch die Schwingungszeit und verwickelt die Experimentalbedingungen durch Einführung einer neuen Veränderlichen. Mehrmalige Reize in beliebigem Rhythmus sind leicht dadurch herzustellen, dass man

mehrere grössere Eisennägel in den Rand der Scheibe mit geeigneten Zwischenräumen einschraubt. Der Rhythmus kann natürlich auch durch Veränderung der Umlaufsgeschwindigkeit abgestuft werden.

Das andere Magnetinductorium ist kleiner und einfacher (Taf. II). Es ist auch nur für Einzelreize eingerichtet. Will man es zu häufigen Reizungen oder zum Tetanisiren brauchen, dann muss es mit einem Motor verbunden werden. Der Apparat besteht aus einem festen Hufeisenmagnet mit Polstücken (*r*) aus weichem Eisen und auf diesen geschobenen Drahtspulen. Der Anker (*b*) ist mit der Axe beweglich und kann längs derselben verschoben werden. Durch Umlegen der Kurbel (*a*) wird eine Feder gespannt, welche eine halbe Umdrehung des Ankers bewirkt, der dann an den Polen mit immer derselben Schnelligkeit vorüber passirt und Ströme inducirt, deren Stärke durch Verschiebung des Ankers an der Axe zu bemessen sind.

Dieser Apparat steht immer ohne Weiteres zum Gebrauch fertig, liefert stets dieselbe wohlbekannte und leicht graduirte Wirkung und eignet sich ebensogut zur Reizung der Muskeln wie der Nerven.

Ergebnisse.

Ich beabsichtige nicht, eine ausführliche Darstellung meiner Untersuchungen mit dazugehörenden Protokollen, Ziffern und Curven zu bringen. Meine Bestrebung war auch nicht ein Beweismaterial zusammenzubringen, um proclamirte Folgerungen zu erhärten. Vielmehr war mein Ziel, mich so einzurichten, dass ich, auch vor mehreren Zuschauern, Experimente vorführen könnte, welche die hier hergehörenden Fragen wenn möglich entschieden beantworteten. Dieses Ziel glaube ich auch erreicht zu haben. Bei mehreren Gelegenheiten habe ich vor interessirten Personen und auch vor kleineren Gesellschaften die experimentellen Antworten mancher der wichtigsten und interessantesten Fragen demonstrirt und die Gefahr, dass die Experimente „nicht gelingen“ könnten, ist kaum grösser als bei gewöhnlichen physikalischen „Schulversuchen“. Es handelt sich nicht mehr darum, nach statistischen Formularen ein buntes Material zu behandeln, um daraus von zufälligen Einmischlingen wahrscheinlich mehr oder weniger freie Resultate herleiten zu können, sondern die Forderung ist so hoch gestellt, dass ein jedes Experiment wenn möglich entscheidend sein soll, und also sämmtliche absichtlich unter gleichen Umständen vorgebrachte Versuche dieselbe Antwort abgeben sollen.

Dabei sind zwei wichtige Umstände zu beachten. Erstens, dass der eine Muskel sich nicht dem anderen völlig gleich verhält. Nicht

so, dass es einen qualitativen Unterschied zwischen der Wärmeleistung verschiedener Muskeln unter wechselnden Verhältnissen gebe. Eine Andeutung an etwas dergleichen haben meine zwar nur auf Froschmuskeln beschränkten Versuche nicht abgegeben. Dagegen ist ein quantitativer Unterschied hinsichtlich der Wärmeproduction verschiedener Muskeln ganz unverkennbar, oft sogar stark hervortretend, und ebenso wechseln die Wärmeausschläge desselben Muskels bei verschiedenen Zeitmomenten in Folge verschiedener früherer Behandlung u. s. w. Wir haben deshalb kein Recht zu fordern, dass der numerische Ausdruck der Grösse der Wärmeproduction von der Individualität oder von dem Zustande des Muskels im Momente des Versuches unabhängig sein sollte.

Der andere zu beachtende Umstand ist, dass nicht alle Fragen solcher Natur sind, dass sie an und für sich klar angeben, wie der Versuch eingerichtet sein muss, um die Frage zu entscheiden. Manchmal ist es im Gegentheil mehr als misslich, zu finden, wie man der experimentellen Lösung zu Leibe kommen soll, oder abzumachen, ob die bei den Experimenten gefundenen Ziffern als der richtige Ausgangspunkt angewendet werden können, um die Antwort zu formuliren. Wenn auch die Methoden, die Wärmeproduction zu messen, noch so empfindlich und zuverlässig sein mögen, so kann man doch nicht jede Frage, die damit zusammenhängt, mit einem Schlage erledigen. Es wird eine Anzahl Fragen übrig bleiben, deren Lösung Schwierigkeiten bereiten und den Scharfsinn der Forscher auf die Probe stellen. Ich hatte das Missgeschick, mit ein paar Fragen anfangen zu müssen, wo der mir zu Gebote stehende Scharfsinn nicht genügte, eine solche Form der Versuche zu finden, dass die Antworten ganz entscheidend und unanfechtbar ausfallen.

Hier folgen die wichtigsten meiner bis heute gewonnenen Ergebnisse auf diesem Gebiete.

Die Wärme des ruhenden Muskels.

Meine Experimente beschäftigen sich nur mit überlebenden, circulationslosen Froschmuskeln, und es ist zu vermuthen, dass die Verhältnisse etwas anders bei lebenden Muskeln, vor Allem bei denen der homoiothermen Thieren sich gestalten dürften.

Die erste zu beantwortende Frage scheint mir diese zu sein: Erzeugt der überlebende Muskel im ruhenden Zustande nachweisbare Wärmemengen?

Diese Frage ist, so viel ich weiss, neu. Ob man gemeint hat,

sie biete zu wenig Interesse, oder ob man die Antwort für selbstverständlich gehalten hat, lasse ich dahin gestellt sein. Sie ist doch nicht so ganz unwichtig. Man hat ja schon den Stoffumsatz des überlebenden Muskels, besonders die gasförmigen Umsatzproducte betreffend, zum Gegenstand langer und mühsamer Untersuchungen gemacht, welche freilich noch nicht als beendigt anzusehen sind. Will man sich nicht damit begnügen, einen steten Umsatz festzustellen, sondern hält es der Mühe werth, den dabei sich abspielenden Processen etwas näher zu treten, so gehört auch dazu, ihre daraus resultirende Wärmetönung zu bestimmen. Im Schlussstadium der Existenz des überlebenden Muskels, da er in Todtenstarre übergeht, was ja von Manchen als der letzte Lebensact des Gewebes, als die letzte Aeusserung seiner Vitalität betrachtet wird, glaubt man eine manchmal nicht unbedeutende Wärmeentwickelung gefunden zu haben, und dass dies zutrifft, wenn der Muskel durch Erwärmung zu schneller Erstarrung gebracht wird, ist experimentell gezeigt worden.[1] Wann dies wärmeproducirende Stadium anfängt und wie es eingeleitet wird, ist wenig untersucht worden. Es ist ja nicht undenkbar, dass diese Wärmeentwickelung schon früh beginnt, um nach einem steten Zuwachs ihr Maximum auf der Höhe des Erstarrungsprocesses zu erreichen. Jedenfalls kann die Frage nicht auf apriorischem Wege entschieden werden.

Ausser dem mehr theoretischen Interesse, das uns also an die experimentelle Lösung dieser Frage mahnt, hat die Sache auch eine relativ praktische Seite, indem die Deutung gewisser Ergebnisse meiner Untersuchungen, von welchen unten berichtet wird, sich einigermaassen hieran anknüpft.

Wie man die Frage experimentell entscheiden sollte, schien mir Anfangs ganz einfach. Meine ersten Experimente stützten auch diese Meinung, die aber durch spätere Erfahrungen wesentlich modificirt wurde.

Auf zwei Wegen bin ich nun an diese Experimente herangetreten. In einigen Versuchen brachte ich in den thermometrischen Apparat zwei symmetrische Muskeln eines Frosches ein, nachdem ich den einen Muskel durch Erwärmen oder durch Vergiftung getödtet hatte. In anderen Versuchen liess ich beide Muskeln unverzehrten, aber zwischen dem einen Muskel und der ihm nächsten Löthstelle schob ich eine wärmeisolirende Schicht hinein, welche aus 0·25 mm starken Films

[1] W. Dybkowsky und A. Fick, Ueber die Wärmeentwickelung beim Starrwerden des Muskels. *Vierteljahresschrift d. naturf. Gesellschaft in Zürich.* Jahrg. 1867. Myotherm. Untersuch.



bestand. Bei allen diesen Versuchen beobachtete ich die Lage des Nullpunktes am Galvanometer sowohl vor Einführung des Präparates, als während des Aufenthaltes der Muskeln in der Kammer, und nachdem sie aus der Kammer entfernt waren. Als Messinstrument habe ich nicht nur die Apparate *F* und *G*, sondern auch *D* versucht.

Die ersten Versuche führte ich mit Galvanometer *F* aus. Er gab während mehrerer Stunden einen deutlichen positiven Ausschlag, zeigte also eine höhere Temperatur der den lebenden Muskel berührenden Löthstelle an. Die Grösse der Ausschläge wechselte etwas bei den verschiedenen Muskelpräparaten, aber nicht mehr, als dass man es füglich entweder aus individuellen Verschiedenheiten, welche von Nahrungs- und Gesundheitszuständen des Thieres, von welchem das Präparat genommen war, herleiten konnte, oder anderenfalls auch zum Theil aus der Zimmertemperatur, von welcher die Froschmuskeln gewissen Experimenten gemäss (s. Litteraturübersicht 23 und 24) sehr beeinflusst werden.

Die Experimente mit dem Galvanometer *D* liessen die Frage ganz unentschieden. Die ausserordentliche Empfindlichkeit dieses Apparates gegen strahlende Wärme macht es, dass er kaum zum Stillstehen zu bringen ist. Er hat praktisch genommen keine Nulllage und deshalb werden Ausschläge, welche sich über längere Zeitdauer erstrecken, für völlig werthlos. Hierzu kommt, dass man die beiden Muskeln schwerlich so placiren kann, dass sie gleich weit von den bezw. Löthstellen kommen und ihnen gleich grosse Oberflächen zuwenden, was unumgängliche Bedingungen sind, um einen exacten Vergleich zwischen den bei dieser Art von Versuchen von den Muskeln ausstrahlenden Wärmemengen anstellen zu können.

Der erste Versuch mit Galvanometer *G* gab auch ein positives Resultat; in den folgenden Versuchen aber wurden die Ergebnisse sehr wechselnd und forderten zur Vorsicht bei der Schlussfolgerung auf. Es wäre wohl denkbar, dass z. B. die Muskeln, welche in den ersten Versuchen so deutliche Wärmeausschläge gaben, Zusammenziehungen ausgeführt haben und dem zu Folge erwärmt worden sind. Sonst ist es ja nicht so ungewöhnlich, dass Froschmuskeln, die in der Luft hängen, fibrilläre Zuckungen, aber auch Totalzuckungen mit dauernden Verkürzungen aufzeigen, besonders wenn sie vorher stark gereizt waren. Das letztere trifft bei meinen Versuchen zwar nicht zu, auch habe ich nicht beobachtet, dass fibrilläre Zuckungen eines unbelasteten Muskels irgend eine merkbare Erwärmung bewirkt haben. Aber die Möglichkeit, dass Zusammenziehungen vorgekommen sind und die Ausschläge veranlasst haben, welche ich in meinen ersten Versuchen

notirte, ist nicht ausgeschlossen. Ich machte dann neue Versuche, aber so, dass ich von dem lebenden Muskel einen Draht durch den Boden der Kammer zu einer Schreibevorrichtung zog, und also im Stande war, zu beobachten, ob der Muskel Zuckungen ausführte. In keinem der folgenden Versuche zeigte der Muskel eine Spur der Verkürzung, und die Ergebnisse dieser Versuche, welche alle mit Apparat *G* ausgeführt wurden, wurden noch immer wechselnd, wenn auch überwiegend positiv.

Die Versuche mit zwei unverzehrten, überlebenden Muskeln, von welchen der eine durch ein Filmblättchen von seiner Löthstelle geschieden war, scheinen ja auch ziemlich frei von dem Verdacht zu sein, dass der Ausschlag von Muskelzusammenziehungen herkommen sollte, da dann in diesen Versuchen beide Muskeln sich zusammenziehen müssten. Wenigstens war für den einen Muskel nicht mehr Grund vorhanden, in Thätigkeit zu gerathen, als für den anderen. Die Ausschläge wurden in dem ersten mit dem Apparat *F* ausgeführten Versuche klein, aber einheitlich; nicht so bei den späteren, mit dem Apparat *G* ausgeführten. Dies hing aber, wie die nähere Prüfung zeigte, von einem groben Fehler bei Ausführung der Versuche ab.

Die Experimente wurden so gemacht, dass ich erst die Nulllage des Galvanometers bestimmte, nachher die Kammer aufmachte und das Präparat hineinbrachte, die Kammer wieder schloss und nach einer halben Stunde oder mehr die Galvanometerausschläge in bestimmten Zeiträumen zu beobachen anfing, damit einige Stunden (oder Tage) fortfuhr, um endlich die Kammer nochmals zu öffnen, das Präparat herauszunehmen, sie wieder zu schliessen und endlich die Nulllage nochmals zu controliren. Ich bemerkte nun freilich Unterschiede zwischen der zuerst beobachteten und der letzten Nulllage, ahnte aber nicht, wie viel das zu bedeuten hatte, weil der Galvanometer sonst tagtäglich fast unbeweglich stand, d. h. innerhalb eines sehr kleinen Bereiches, dessen Grösse doch nach der Entfernung des Richtmagnetes und der Beschaffenheit des Wetters wechselte, oscillirte. Ich war deshalb allzu geneigt, anzunehmen, dass etwas im Zimmer oder am Apparate während der Versuchsstunden von seinem Platze gerückt war. Da aber die Ausschläge nicht länger in demselben Sinne währten, machte ich endlich eine nähere Untersuchung, wobei ich entdeckte, dass eine Drehung der cylindrischen Hülle der Muskelkammer um ihre Axe eine Derivation des Magnetes veranlasste. Eine solche Drehung aber war nicht ausgeschlossen, wenn der Cylinder, um die Kammer zu öffnen und zu schliessen, entfernt und wieder angebracht wurde. In Apparat *F*

war die Hülle mit Bajonettverschluss zu befestigen und wurde deswegen immer in derselben Lage fixirt. In Apparat *G* war zu dieser Zeit keine Anstalt getroffen, um dem Cylinder immer dieselbe Stellung zu sichern.

Die Fehler waren leichter zu beseitigen, als gefunden. Nachdem wurde ein neuer Versuch gemacht mit Muskeln eines kürzlich aus dem Aquarium geholten Frosches, doch gaben sie keinen Wärmeüberschuss für den lebenden Muskel. Dagegen lieferten sämmtliche Versuche mit Muskeln von Fröschen, die seit einigen Tagen im erwärmten Zimmer verweilten, positive Resultate solcher Grösse, dass sie Zweifel kaum gestatteten. Später werde ich zeigen, dass man ein Kriterium, dass der Muskel Wärme an die Thermoleitung abgiebt, schaffen kann. Dies Kriterium wurde in den folgenden Versuchen selten vermisst.

Als schliessliches Ergebniss bleibt noch übrig: dass nicht alle überlebenden, ruhenden Froschmuskeln nachweisbare Wärmemengen frei machen, aber die meisten und besonders die höher temperirten (Zimmertemperatur) thun es.

Wahrscheinlich ist der Unterschied nur quantitativ. Weitere Untersuchungen sind aber erforderlich, um dies endgültig festzustellen.

War die erste Frage, ob der ruhende Muskel Wärme frei macht, neu, so ist dagegen die zweite, ob der ruhende Muskel bei der Dehnung erwärmt wird, um so älter. Heidenhain behauptet, auf seine Experimente sich stützend, dass die Dehnung des Muskels mit keiner Wärmetönung verknüpft sein sollte, und meint, dass die entgegengesetzten Beobachtungen auf Experimentirfehlern beruhen. Doch sagt er nicht, wo diese Fehler stecken, oder wie es ihm selbst gelungen ist, ihnen zu entgehen. Es ist mir noch heute unerklärlich, wie ihm bei den Ausführungen seiner Experimente Ausschläge bei den Dehnungen in der Regel entgehen konnten. Ausser J. Steiner haben diejenigen, welche mit Heidenhain's und anderen Methoden arbeiteten, auch angegeben, dass die Muskeln durch Dehnung erwärmt wurden. So ist es auch denen ergangen, welche mit Fick's Apparaten gearbeitet haben.

Für mich ist die Frage noch heute nicht völlig entschieden. Es wäre nicht leicht, alle die Versuche zu zählen, welche ich im Laufe der Jahre gemacht habe, um Klarheit hierüber zu bekommen. So lange ich mit Fick's Apparaten arbeitete, waren die Ergebnisse in dieser Hinsicht nur sehr selten zweifelhaft, wenigstens in Beziehung auf die Richtung der Ausschläge, wenn auch deren Grösse innerhalb recht weiter Grenzen wechselte. Nachdem ich andere Methoden versucht

hatte, bekam ich in der Regel die gewöhnlichen Ergebnisse, aber allmählich und in dem Maasse, wie ich mehrere und schärfere Methoden zu verwenden anfing, ergaben sich öfter entgegengesetzte Resultate.

Es gab eine Zeit, wo es mir vorkam, als ob die Belastung des Muskels einen Wärmeausschlag, und die Entlastung einen Abkühlungsausschlag gab, wenn die Zimmertemperatur im Zunehmen, und das entgegengesetzte, wenn die Zimmertemperatur im Sinken war. Oefters ist das Muskelpräparat im Anfange einer Versuchsserie durch Wasserverdunstung abgekühlt, und oft auch die Muskelkammer aus derselben Veranlassung kälter als die Luft des Arbeitszimmers und die durch Vermittelung der Leitungsdrähte von dieser Luft her erwärmten Thermoelemente. In diesem Stadium treten die Wärmeausschläge bei Belastung auf, und war die Kammerluft unvollständig angefeuchtet oder ungenügend verschlossen, so dass die Abdunstung von den Muskeln und Kammerwänden die Temperatur des Präparates unter der des Zimmers fortwährend behielt, blieben die Verhältnisse dauernd und die Dehnungsausschläge unverändert, wenigstens zur Richtung. War aber die Muskelkammer gut gefeuchtet und geschlossen, wurde der Temperaturunterschied zwischen Präparat und Thermosäule nach und nach ausgeglichen, und in demselben Maasse nahm die Grösse der Dehnungsausschläge dann auch ab. Ein zweites Stadium trat nun ein, wo Belastung und Entlastung keine thermischen Wirkungen hervorzubringen schien. Dies unter der Voraussetzung, dass die Zimmertemperatur unverändert blieb. Wurde endlich der Muskel durch Arbeit wärmer (oder die Säule, z. B. in Folge einer plötzlichen Senkung der Zimmertemperatur abgekühlt), so vertauschten sich die Verhältnisse. Die Belastung des Muskels gab einen Abkühlungsausschlag, seine Entlastung einen Wärmeausschlag — drittes Stadium.

Nachdem mir dies bekannt geworden war, sind mir nicht selten Versuchsserien begegnet, wo die Dehnungen Anfangs stattliche Wärmeausschläge gaben, welche aber im Laufe der Versuche durch die allmähliche Erwärmung des Muskels kleiner und kleiner wurden, dann durch den Nullwerth passirten und endlich negative Werthe annahmen, also alle drei Stadien durchmachten.

Diese Erscheinung zeigt sich ziemlich unabhängig von der Beschaffenheit des wärmemessenden Apparates. Doch werden die Ausschläge kleiner, ceteris paribus, bei den Aufstellungen, welche die Verschiebung zwischen Muskel und Säule beschränken. In dieser Verschiebung haben wir ohne Zweifel die wesentliche Veranlassung dieser Ausschläge zu suchen. — Wenn der Muskel belastet wird, schmiegt er sich nicht mehr so vollständig an die Thermosäule, deren gemein-

same Berührungsfläche wird vermindert. Ist dann der Muskel kälter als die Säule, so wird die Folge ein Wärmeausschlag sein, ist aber der Muskel wärmer, tritt das Entgegengesetzte ein, und wenn beide gleich warm sind: Null. Denn die Ueberführung der Wärme zwischen Muskel und Säule steht natürlich im geraden Verhältniss nicht nur zum Temperaturunterschiede, sondern auch zur Grösse der Contactfläche dieser beiden. Dies ist ohne Zweifel die wichtigste Ursache und die wichtigste Erklärung dieser Ausschläge.

Hier begegnet uns nun das oben S. 98 erwähnte Kriterium, durch deren Hülfe wir in den meisten Fällen entscheiden können, ob der Muskel zur Thermoleitung Wärme abgiebt, oder im Gegentheil diese an jenen. Solche Verhältnisse treten, von Form und Lage der Säule deutlich unabhängig, ein, werden aber einen um so geringeren Effect hervorbringen, je weniger die Grösse der Berührungsfläche wechselt, und deswegen auch geringer bei den Apparaten, wo die Thermosäule sich den Muskeln nahe bei ihrem Ausgangspunkte aus der Symphyse, welche die Lage der Muskelfäden hier wesentlich bindet, anlegt. Aber auch hier vermisst man diesen Effect nicht ganz, und damit stimmt gut die leicht zu machende Beobachtung überein, dass auch bei dieser Befestigungsweise der Muskel durch die Belastung schmäler wird und dabei einen Theil der Thermoleitung, den er früher bedeckte, entblösst. Es ist also mittelbar, d. h. durch die Leitung der Kupferlamelle, die Wärmetönung an die Löthstellen übermittelt wird. Diese Leitung erfordert etwas Zeit, und hiermit ganz übereinstimmend zeigt es sich, dass diese Ausschläge verspätet und zögernd nach der allgemeinen Gestalt bedeutend verschieden von den mit den Muskelzuckungen gewöhnlich verbundenen Ausschlägen einhergehen.

Eine erschöpfende Erklärung der wechselnden Dehnungsausschläge ergiebt das oben Angeführte wohl nicht, denn es giebt noch einen oft complicirenden Umstand zu beachten. Es kann nämlich leicht vorkommen, und Veranlassungen fehlen selten, dass der Muskel nicht überall dieselbe Temperatur hat. Giebt es dann eine Verschiebung zwischen Muskel und Säule, so kann es leicht geschehen, dass die Säule theilweise wärmere oder kältere Muskelelemente berührt und also Ausschläge in der einen oder anderen Richtung zum Vorschein kommen. Eine solch' verschiedene Temperatur innerhalb eines Muskels kann man sich als in verschiedener Weise entstanden denken, und die vollständige Ausgleichung dürfte nur verhältnissmässig langsam erfolgen. Ist z. B. der Muskel, wenn er in den Apparat gebracht wird, kälter als die Säule, so wird die Säule am nächsten und meistens den Theil

des Muskels erwärmen, den sie berührt, und jede Verschiebung zwischen Muskel und Säule lässt nacher diese zum Theil in Berührung mit kälteren Muskelelementen kommen — und der Ausschlag ist da. Solche Ausschläge werden an sich aus leicht einzusehenden Gründen ziemlich unbeständig, veranlassen und erklären das Auftreten schnellerer, sonst unmotivirter Wechselungen der Grösse der Dehnungsausschläge. Diese Wechselungen werden deshalb kleiner, je vollständiger den Verschiebungen zwischen Muskel und Säule vorgebeugt wurde, und je besser es gelungen ist, das Aufkommen von Temperaturunterschieden innerhalb des Präparates zu verhüten. Deshalb gaben auch die Versuche mit Aufstellung *G* nicht nur die kleinsten, sondern auch die gleichmässigsten Dehnungsausschläge.

Da aber diese Ausschläge im Laufe der Versuche nicht nur in der Grösse, sondern auch in der Richtung wechseln, so ist es klar, dass die Hauptfrage, ob diese Muskeldehnung Wärme giebt oder nicht, noch unentschieden bleibt. Die Ausschläge, welche ich bekommen habe, können ja theilweise von Dehnungswärme abhängig gedacht werden. Aber sicher ist, dass dann diese Wärme unbedeutend sein muss, und da der ganze Dehnungsausschlag, den ich mit dem *G*-Apparat bekommen habe, auch wenn er am grössten war, in der Regel kleiner ausfiel als der Wärmeausschlag nach einer freien maximalen Zuckung, so kann die Dehnung an sich nur sehr kleine oder gar keine Wärmemengen frei machen. Ich halte es deshalb nicht für unwahrscheinlich, dass Heidenhain in Hinsicht auf den Schlusssatz recht gehabt hat, dass also die Dehnung des Muskels nicht mit irgend einer Erwärmung verbunden ist, und ich erachte es fast als bewiesen, dass die Wärmemengen, welche unter solchen Bedingungen im Muskel frei werden, jedenfalls weit geringer sind als diejenigen, welche im Allgemeinen bei der Muskelarbeit erscheinen.

Ehe ich das Capitel über die Wärmeverhältnisse des ruhenden Muskels abschliesse, möchte ich mit einigen Worten ein anderes hierhergehöriges Experiment erörtern. Wenn man schnell nach einander einen Muskel belastet und entlastet — also man lässt ihn eine kurzdauernde Dehnung erleiden —, so nimmt der Muskel bald die Gestalt wieder, welche er vor der Dehnung hatte, wenigstens dieser am nächsten. Damit er die frühere Form genau annehmen soll, ist etwas längere Zeit von Nöthen. Ist nun ein solches Experiment vorübergehender Dehnung mit irgend einer Wärmetönung verbunden?

Diese experimentelle Entscheidung ist weniger verwickelt, als bei der vorhergehenden Frage, da der Muskel beim Schluss jedes Versuches

ziemlich genau dieselbe Form wieder bekommen hat, welche er vor dem Versuche inne hatte, und die Berührungsfläche zwischen Muskel und Säule wieder fast dieselbe geworden ist. Bei solchen Versuchen bekommt man manchmal Oscillationen der Magnetnadel aus derselben Veranlassung wie bei den vorerwähnten Dehnungsversuchen — aber zu beiden Seiten — einen Impuls für die Belastung und einen entgegengesetzten für die Entlastung. Von da ab schwankt die Nadel um ihre frühere Gleichgewichtslage oder ihr sehr nahe. Im zweiten Stadium (s. oben S. 99), wo die Belastung keinen Ausschlag bewirkt, bleiben diese jetzt erwähnten Schwankungen natürlich fort, und die Nadel steht manchmal scheinbar fast unbeweglich. Jedoch wenn man in diesem Stadium das Experiment mehrere Male in schneller Folge wiederholt, so findet man, dass der Muskel allmählich erwärmt zu werden scheint. Er bekommt jedes Mal, wenn die Dehnung wiederholt wird, einen ganz kleinen Wärmezuschuss. Befindet sich der Muskel im ersten Stadium, so kann man schon a priori ausrechnen, dass ein solcher Wärmeausschlag erscheinen soll, ganz unabhängig davon, ob Wärme bei den Dehnungen frei wird oder nicht. So steht die Sache nicht im zweiten Stadium, und im dritten erwartet man einen negativen Ausschlag — einen Abkühlungsausschlag —, wenn die Temperatur des Muskels von den Dehnungen nicht beeinflusst wird. Ein positiver Ausschlag im dritten Stadium müsste also a fortiori zu Gunsten einer Temperatursteigerung des Muskels entscheiden.

Indem ich dies beachte, schliesse ich aus meinen einschlägigen Versuchen, dass wiederholte, momentane Dehnungen des Muskels kleine Wärmemengen frei machen.

Vielleicht ist es Reibung der Muskelelemente unter sich oder gegen die Säule, welche allein diese kleinen Wärmemengen verschulden; vielleicht kommt hier ein anderes Moment hinzu, welches dann mit der noch problematischen Wärmeentwickelung der Muskeldehnung zu verknüpfen wäre.

Sehr wichtig finde ich, was diese Versuche mit den ruhenden Muskeln uns lehren, dass ein Ausschlag des thermometrischen Apparates nicht immer nothwendig eine Wärmetönung des Muskels anzeigt, sondern von einer Veränderung der Berührungsfläche zwischen Muskel und Säule abhängen kann, und wie wir vermeiden können, von solchen Ausschlägen irregeleitet zu werden, indem wir den Antheil des Ausschlages, den diese Veränderungen bewirken, besonders untersuchen.

Die Wärme des arbeitenden Muskels.

Von allen den hier sich andrängenden Fragen können nur einige der wichtigsten aufgenommen werden. Die erste Frage lautet: Welche Verhältnisse bedingen den Unterschied der Wärmeproduction bei den verschiedenen Versuchen?

So gewiss es ist, dass der Muskel bei der Arbeit erwärmt wird, ebenso sicher ist es, dass die Grösse der Erwärmung innerhalb weiter Grenzen wechselt. Die Ursache dieser Wechselungen haben wir theils innerhalb des Muskels, theils ausserhalb desselben zu suchen. Durch Auswahl und verschiedene Behandlung des Materials und durch Variirung der experimentellen Bedingungen können wir die beiden Arten dieser Ursachen modificiren und somit ergründen, ob und wie weit ein jeder für sich die Wärmeproduction bestimmt.

Die inneren Ursachen, insofern wir sie kennen, sind bald erkannt; sie sind Nahrungs- und Gesundheitszustand des Thieres und dessen Muskeln, und der vorhergehender Wirksamkeit zufolge mehr zufällige Zustand der letzteren, und endlich die Temperatur der Muskeln. — Die äusseren Umstände, welche man bis heute in Betracht gezogen hat, sind 1. die Art und Stärke des Reizes; 2. die Spannung während der Wirksamkeit des Muskels und die von der Spannung theilweise abhängige Arbeit und Formveränderung. — Halten wir uns einen Augenblick bei den inneren Ursachen auf.

Es ist oft hervorgehoben, dass einige Frösche, sogar ganze Jahrgänge, Muskeln haben sollten, welche nur sehr kleine Wärmemengen abgeben. Auch dürfte Niemand bezweifeln, dass die ausgeschnittenen Muskeln eines vor Hunger oder Krankheit sterbenden Frosches einen weit kleineren Energievorrath zur Verfügung haben und deshalb weit geringere Wärmengen produciren können als die eines frischen und gut genährten Frosches. Die Muskeln des schwachen Frosches können auch nicht so viel mechanische Arbeit leisten, ehe sie ermüden, als die eines kräftigen Frosches. Daraus folgt wohl nicht, dass eine jede Reizung eine geringere Wärmeerzeugung veranlassen soll, sondern eigentlich nur, dass die Summe aller Wärme, die der Muskel überhaupt durch Reizung zu leisten im Stande war, vermindert ist. Aber das erstere wird dabei auch einigermaassen verständlich und sogar wahrscheinlich. Dann tritt als die wichtigste Frage in den Vordergrund, ob es Muskeln giebt, deren Fähigkeit, Wärme frei zu machen, augenfällig abgenommen hat, ohne dass die Arbeitsfähigkeit sichtbar gelitten hat. Diese Frage ist insofern wichtig, als sie an eine principiellen Frage streift, wie nahe Wärme- und Arbeitsproduction mit

einander verbunden sind. Um diese Frage endgültig zu entscheiden, wären gewiss manche und lange Versuche von Nöthen. Besonders darauf eingerichtete Untersuchungen sind, so viel ich weiss, noch nicht gemacht worden. Von dem, was mir zufällig begegnet ist, habe ich den Eindruck bekommen, dass einige Präparate wohl anfänglich schon weit geringere Wärmemengen als die normalen geliefert haben, aber dass diese schwachen Präparate alten, oft gereizten Präparaten gegenüber, bei welchen die Wärmeproduction auch deutlich abzunehmen pflegt, ehe es möglich ist, eine Verminderung der mechanischen Leistungen sicher zu beobachten, sich ähnlich verhalten. Die Sache ist aber thatsächlich einer besonderen Untersuchung werth.

Heidenhain betonte das hier erwähnte Verhältniss, dass die Ermüdung die Wärmeproduction früher und stärker ermässigt als die Zuckungshöhe, und gegen diesen Satz ist keine Verwahrung eingelegt worden, er ist im Gegentheil von anderen Forschern oft bestätigt worden. Die experimentellen Anordnungen der Heidenhain'schen Versuche sind allerdings nicht einwandsfrei. Da aber Heidenhain und andere Forscher (auch ich) oft beobachteten, dass die Ermüdung die Wärmeproduction zum Minimum reducirt hatte, während der Muskel bei jeder Zuckung den Schreibhebel so weit in die Höhe schleudert, dass man sicher sein kann, dass eine ebenso grosse Zuckung vor der Ermüdung einen ganz deutlichen Wärmeausschlag gegeben hätte, so ist die Sache wohl nicht zu leugnen. Das einzige, was mir noch Zweifel einflösst, ist der Umstand, dass der Verlauf der Zuckung des ermüdeten Muskels viel langsamer ist, als der des unermüdeten Muskels. Es giebt also noch einen Faktor, der von einem zum anderen Versuche wechselt, einen anderen Factor als den Ermüdungsgrad. Ich werde gleich einen anderen Fall besprechen, wo derselbe Faktor sich einmischt und möglicher Weise dieselbe Rolle spielt.

Es wäre ja denkbar, dass der nächste Grund zum Wegfall der Zuckungswärme in etwas liege, was mit der Langsamkeit der Zuckung zusammenhänge, ohne dass es seinem Wesen nach mit der Müdigkeit zusammenfiele. Die Zuckungswärme sollte dann im näheren Kausalzusammenhange mit der Schnelligkeit der Zuckung stehen. Aber da diese Schnelligkeit unzweifelhaft in hohem Grade von dem Ermüdungszustande abhängt, so wird das Ganze bei unserer jetzigen mangelhaften Kenntniss der Müdigkeit und der Natur der Muskelfunctionen im Uebrigen meist ein Wortgefecht.

Eins steht aber fest, dass derselbe Muskel bei verschiedenen Versuchen mit gleich starken Reizen gleich grossen mechanischen Effect, aber ganz verschiedene Wärmemengen ab-

geben kann,[1] und zwar in dem Maasse, dass das Verhältniss zwischen producirter Arbeit und Wärme bei dem ermüdeten Muskel scheinbar gegen die Unendlichkeit merklich tendirt.

Der überlebende Muskel verliert, auch wenn er nicht durch wiederholte Reizungen ermüdet wird, doch mit der Zeit allmählich die Fähigkeit, Arbeit und Wärme zu leisten. Er benimmt sich dabei kaum anders, als ein durch Arbeit ermüdeter Muskel, welcher eine Erholungsfrist bekommen hat, so dass seine Functionsfähigkeit momentan gesteigert ist, aber nach wenigen Reizen schnell zu sinken beginnt. Ein eingehenderes Studium dieser Verhältnisse liegt noch nicht vor, obwohl auch dies ohne Zweifel der Mühe werth wäre.

Uebrig ist noch, den Einfluss der Temperatur auf die Wärmeproduction des arbeitenden Muskels zu besprechen. In der historischen Abtheilung habe ich diese Frage, welche Gegenstand der Untersuchungen Fick's und seiner Schüler war, schon berührt. Wenn auch ihre Ergebnisse in Einzelheiten nicht völlig übereinstimmen, so sind sie doch in der Hauptsache ganz übereinstimmend, nämlich dass innerhalb gewisser Gesetze (0 bis 30° etwa) der wärmere Muskel unter sonst gleichen Bedingungen mehr Wärme abgiebt, als der kältere. Es ist aber nicht ausgeschlossen, dass der mechanische Effect bei dem wärmeren Muskel grösser ausfallen kann, als bei dem kälteren Muskel. Dabei spielen andere Faktoren mit, deren eingehende Besprechung mich zu weit vom Thema ableiten würden. Hier kann ich aber nicht unberücksichtigt lassen, dass, wie durch die Untersuchungen Fick's und noch vollständiger durch die Gad's und Heymann's erwiesen ist, die Gestalt der Zuckungscurve mit der Temperatur des Muskels bedeutend geändert wird, so dass die ganze Zuckungszeit bei höherer Temperatur viel kürzer wird, als bei niedrigerer. Also sind hier wie bei der Ermüdung die langsamere Zuckungsform und die verminderte Wärmeproduction gleichzeitig vorhanden. In Ermangelung eigener eingehender Untersuchungen über dieses Thema will ich von weiteren Erörterungen absehen.

Ich wende mich nun zu den äusseren Faktoren, welche auf die Wärmeproduction des Muskels bestimmend einwirken, und zwar zunächst zu der

Abhängigkeit der Wärmeproduction vom Reize.

Die Reize können wechseln sowohl in ihrer Art, als in ihrer Intensität. Nur die elektrischen Reize kamen bis heute bei den myo-

[1] Alle weitgehenden theoretischen Betrachtungen, welche von einem constanten Verhältnisse zwischen Arbeit und Wärme der Muskelsubstanz ausgehen, verlieren hiermit ihre experimentelle Grundlage.



thermischen Untersuchungen zur Anwendung. Aber auch die elektrischen Reize scheiden sich in mehrere Arten. Sie können den Muskel direct treffen oder indirect durch den Nerv, und sie können äusserst kurzdauernde Inductionsschläge, sog. Momentreize oder langsamer verlaufende Stromschwankungen, sog. Zeitreize sein. Metzner stellte vergleichende Versuche an, um zu ermitteln, ob diese vier verschiedenen Reizungsarten, directe und indirecte Momentreize und directe und indirecte Zeitreize die Wärmeproduction des Muskels in ungleichem Maasse beeinflussen. Es war aber nicht so leicht, den Einfluss der verschiedenen Reizarten mit einander zu vergleichen, da man nicht gut bestimmen kann, ob und wann man gleich starke Reize angewandt hat. Metzner braucht, mit Recht oder Unrecht, die Aehnlichkeit der mechanischen Leistungen als Kriterium für die Gleichheit der Reizstärken. Was er in seinen Versuchsprotokollen vorgebracht hat, scheint mir nicht genügendes Material zur Entscheidung der Frage abzugeben.

Auch meine auf dieselbe Frage hinzielenden Versuche haben noch nicht zu völlig entscheidenden Ergebnissen geführt. Die Schwierigkeit, ganz gleiche Momentreize zu bekommen, legen der unmittelbaren Lösung der Frage bedeutende Hindernisse in den Weg. Ich habe aber diese Schwierigkeit dadurch umgangen, dass ich mehrere Momentreize verschiedener Stärke verwendete, die aber so gewählt waren, dass ein oder einige etwa mittelgrosse, d. h. halbmaximale Zuckungen ergaben. Allsdann suchte ich mit Hülfe des Magnetinductoriums den Zeitreiz auf, der ebenso hohe Zuckungen ergab. In allen Versuchen wurden die Wärmeausschläge aufgezeichnet. Eine Vergleichung zwischen den Wärmeausschlägen, welche gleich hohen Zuckungen angehörten, war dann leicht durchzuführen. Da aber die Ergebnisse nicht ganz übereinstimmend in allen Versuchsserien wurden, so sah es so aus, als enthalte die Frage eine Complication. Man wird wohl nächstens daran denken, dass es sich auch hier um einen Unterschied der Contractionszeit handeln könnte, um so mehr, als man behauptet hat, dass der Zeitreiz die Zuckungszeit verlängern sollte. Die Antwort muss dann vorläufig für nähere Prüfung ausstehen. Dies geht aber aus meinen Versuchen hervor, dass directe moment- oder zeitgereizte Muskeln oft gleiche Wärmemengen bei gleich hohen Zuckungen abgeben. Unentschieden bleibt dagegen, warum es nicht immer so geschieht, und worauf ein bisweilen vorhandener Unterschied beruhen kann.

Die nächste Frage wird die sein: Wie verhält sich die Wärmeproduction zur Reizstärke?

Dass Reize verschiedener Stärke eine ganz wesentlich verschiedene Wirkung auf die Wärmeproduction ausüben, ist unzweifelhaft. Man könnte wohl geneigt sein, a priori anzunehmen, dass die Reizstärke allein die Grösse der chemischen Processe, welche sie einleitet, bestimmte, und das Entgegengesetzte ist wohl nicht sicher bewiesen, obschon es andererseits unstreitig ist, dass die in den Formen mechanischer Arbeit und Wärme erscheinenden Energieumwandlungen auch von anderen, dem Reize beigeordneten Faktoren abhängen.

Es ist ja bekannt, dass, wenn wir einem Muskel Einzelreize zuführen, welche von Null allmählich wachsen, so berühren wir erst ein Gebiet, wo die Reize unwirksam scheinen; es kommt dann ein Punkt, wo der Reiz die ersten Spuren einer Contraction hervorbringt, die sog. Reizschwelle. Jenseits dieser Grenze geben die Reize Anfangs schnell wachsende Zuckungen; nach und nach wird der Zuwachs kleiner, und die Zuckungshöhen nähern sich asymptotisch einem oberen Grenzwerthe, der sog. Maximalzuckung. Dies soll aber kein absolutes Maximum sein, denn wenn wir die Reizstärke immer weiter steigern, kommen wir schliesslich zu einem Punkte, von dem ab die Contractionen wieder wachsen, und nun Uebermaximale genannt werden. Doch ist es nicht völlig abgemacht, dass diese übermaximalen Zuckungen aus Einzelreizen hervorgehen und nicht etwa auf doppelten Reizungen beruhen, wozu die üblichen Reizmethoden gar zu leicht Veranlassung geben. Auch die Frage der Maximalzuckung ist noch ziemlich verwickelt und bei Weitem nicht erledigt.

Was uns hier interessirt, ist zu wissen, ob die Wärmeproduction in ähnlicher Abhängigkeit von dem Reize steht oder nicht. — Erstens ist zu bemerken, dass es nicht schwierig ist, so schwache Reize dem Muskel zuzuführen, dass ein Wärmeeffect nicht zu beobachten ist. Misslicher ist es, abzumachen, ob die ersten Spuren frei gewordener Wärme bei derselben Reizstärke erscheinen als die ersten Spuren der Zusammenziehung.

Danilewsky beobachtete Wärmeproduction bei Reizen, die unter der Reizschwelle des mechanischen Effectes lagen. Ich selbst habe keinen wahren Wärmeausschlag bei so schwachen Reizen gesehen. Natürlich ist das nicht Grund genug, die Richtigkeit der erwähnten Beobachtungen in Abrede zu stellen. Es giebt aber Umstände, welche wahrscheinlich machen, dass Danilewsky irreführenden Einflüssen unterlegen war. Denn wenn wir die Reizstärke über den Schwellenwerth vermehren, so finden wir, dass die Wärmeausschläge wie die Zuckungshöhen wachsen, Anfangs schnell, dann immer langsamer. Wir können also mit den Reizstärken und den entsprechenden Wärme-

ausschlägen als Coordinaten eine Curve construiren. Schauen wir nun diese Curve genauer an, so scheint sie deutlich der Axe der Reize in dem Punkte, der dessen Schwellenwerth entspricht, mit sehr grossem Winkel sich zu nähern, so dass ein Verlauf dieser Curve in merklichem Abstande über diesem Schwellenwerthe eine jähe, sehr unwahrscheinliche Richtungsveränderung voraussetzen sollte. Allerdings müsste sie wenn nicht durch, so doch nahe an diesem Punkte vorbeigehen, was dann Danilewsky's Beobachtungen erklären sollte, wenn er nämlich eine viel empfindlichere Aufstellung als die meinige verwendet hat. Dies ist aber kaum zutreffend.

Da ich aber die endgültige Entwickelung dieser Frage sehr wichtig fand, habe ich ausserdem mehrere Versuchsreihen gemacht, in welchen ich wiederholte Reize, die ein Mal nahe über, das andere Mal nahe unter dem Schwellenwerthe lagen, gebrauchte und übrigens solche Bedingungen einführte, welche die Grösse der Wärmeausschläge möglichst befördern sollte — also grosse Belastung oder isometrische Anordnung bei hoher Ausgangsspannung. Die Reizströme kamen entweder aus dem Magnetisiren als 18 Zeitreize in 0·45 Secunden, oder von einem Cosinusinductorium mit schnell oscillirendem Wagner'schen Hammer und wurden dann dem Muskel jedesmal während 1 Secunde zugeführt. Wie kleine Spuren der Wärme eine jede Reizung hervorgebracht haben möchte, müsste die Summe davon doch merkbar geworden sein. Dies war jedoch nicht der Fall, so lange diese Reizungen auch keine Spur von Contraction hervorbrachten. Um so deutlicher und grösser trat diese Summe hervor, wenn die Reize auch nur wenig über dem Schwellenwerthe lagen.

Aus diesen Versuchen schliesse ich, dass in den von mir untersuchten Muskeln der schwächste Reiz, welcher eine Muskelcontraction bewirkte, auch der schwächste war, der einen Wärmeausschlag gab. Und es scheint mir wenig wahrscheinlich, dass Danilewsky's Muskelpräparate sich anders verhalten haben sollten. Viel wahrscheinlicher ist wohl z. B., dass er minimale Zuckungen in Folge gar zu gewöhnlicher Unvollkommenheiten der Registrirvorrichtungen nicht beachtet hat, oder dass ein anderer Fehler sich hineingeschlichen hat und Galvanometerausschläge aus ganz anderem Grunde als dem vermeinten hervorgebracht worden sind.

Andererseits wird oft erwähnt, dass die Wärmeproduction besonders bei ermüdeten Muskeln nach kleinen, aber doch mechanisch effectiven Reizungen unter der Grenze, wo sie nach Einzelreizen zum Vorschein kommt, gelegen hat. Durch wiederholtes Reizen kann man sie nach meiner Erfahrung doch immer deutlich zeigen. Daraus

geht hervor, dass, wenn Wärmeproduction und mechanische Arbeit möglicher Weise von verschiedenen Functionen des Muskels abstammen, sie doch an Einrichtungen gebunden sind, welche denselben Schwellenwerth der Reizung haben.[1]

In Betreff des Verhältnisses der Wärmeproduction bei den Reizen, welche über dem Schwellenwerthe liegen, bin ich mit den früheren Verfassern ganz einig, welche finden, dass die Wärmeproduction wächst, Anfangs schneller, dann immer langsamer, ganz wie die Zuckungshöhen. Da man aber wahrscheinlich bezwecken will, dass die Wärmeproduction schneller als der mechanische Effect wachsen soll, kann ich nicht recht beipflichten. Das eine wie das andere beruht freilich auch auf anderen Bedingungen, als auf der Stärke des Reizes. Sie werden aber mit ganz verschiedenem Maassstabe gemessen, wenn man sie überhaupt messen kann. Den mechanischen Effect einer Zuckung nach der äusseren Arbeit zu schätzen, würde zu Absurdität führen. Diese Arbeit ist z. B. immer Null, wenn der Muskel unbelastet zuckt, oder wenn er so fixirt wird, dass er sich nicht verkürzen kann. Unter solchen Bedingungen ist aber der mechanische Effect gewiss nicht immer Null und sich nicht immer gleich. Auf der anderen Seite wird es auch nicht leicht werden, den activen Reductionscoëfficienten für die Wärmeausschläge herauszufinden, so dass diese in dieselben Maasseinheiten wie der mechanische Effect umgerechnet werden können.

Die Frage, ob die Wärmeproduction auch ein Maximum erreicht wie die Zuckungshöhe, beantwortete Fick verneinend für den Fall, dass der Muskel gehindert wird, sich zusammen zu ziehen. Dann sollte die Wärme mit der Reizstärke ins Unendliche wachsen. Die publicirten Versuchsprotokolle bestätigen seinen Ausspruch mit gar zu deutlichen Ziffern, aber eben die Grösse und Regelmässigkeit dieser Ziffern flösst mir Misstrauen ein. Meine Versuche deuten nur darauf hin, dass bei Isometrie das Maximum ein Stück höher an dem Maassstabe gestiegen ist. Möglich wäre ja, dass Fick übermaximale Reize gebraucht oder vielmehr, dass anderswo ein Fehler steckt.

Von wiederholten gleichen Reizen gilt, dass, wenn der Rhythmus so langsam ist, dass die eine Zuckung ganz vorüber ist, ehe die nächste beginnt, der Wärmeeffect einer jeden folgenden Zuckung nur so viel kleiner wird, als der der vorhergehenden, wie von der mit jedem Reize wachsenden Müdigkeit bedingt wird. Der Galvanometerausschlag

---

[1] Mit den wiederholten Reizen kann man auch zeigen, dass bei Ermüdung die Wärmeproduction wenn auch vermindert, doch nicht völlig vernichtet wird (siehe oben S. 108).



wird nach zwei solchen Reizen doppelt so gross, als nach einem, nach dreien drei Mal so gross u. s. f., mit den Beschränkungen, welche von den Eigenschaften des Galvanometers und den Abkühlungsverhältnissen abhängen. Darin hat man ein werthvolles Mittel, die Zuverlässigkeit sowohl des Reizapparates, als des thermometrischen Apparates zu controliren, eine Controle, deren Anwendung sehr zu empfehlen ist.

Werden die Reize häufiger, so dass der Muskel nicht zwischen den Zuckungen bis zur Ruhelänge zurückgekommen ist, so kommt ein neues Moment hinzu, welches die Wärmeausschläge beeinflusst, wie es den mechanischen Effect verändert. Dies kommt dann im Laufe der folgenden Abtheilung und wird dort näher berücksichtigt.

Endlich wächst, wenn die Reize so schnell einander folgen, dass sie einen dauernden Tetanus hervorrufen, dann auch die erzeugte Wärmemenge mit der Anzahl der Reizungen. — Wenn der Rhythmus zu einem gewissen Punkte gesteigert wird, soll die reizende Einwirkung auf den Muskel, was den mechanischen Effect betrifft, aufhören. Interessant wäre es zu wissen, ob auch die thermische Wirkung bei demselben Rhythmus nachlässt oder nicht. Da ich die sog. Lücke noch nicht, ausser in den Büchern, gesehen habe, kann ich hierüber keine Meinung äussern.

Schliesslich kommt die Frage:

Wie wirken die mechanischen Bedingungen der Arbeit des Muskels auf seine Wärmetönung ein?

Seitdem die bahnbrechende Arbeit Heidenhain's erschienen, befassen sich die meisten Untersuchungen über Muskelwärme mit dieser Frage. Jedoch ist mir das gewonnene Material als etwas sehr Verwickeltes und Chaotisches vorgekommen, was kaum zu verwundern ist, da ja die mechanischen Bedingungen der Muskelarbeit ins Unendliche wechselnd zu denken sind und es noch Niemand gelungen ist, den Ariadnefaden zu finden, der uns aus diesem Labyrinthe führen kann.

Es ist mehrere Jahre her, dass ich im Zusammenhange mit meinen myothermischen Untersuchungen ziemlich umfassende Versuche über die Bedeutung verschiedener mechanischer Bedingungen für die Muskelarbeit ausführte und das Wichtigste meiner Ergebnisse und Schlüsse publicirte.[1]

Im Anschluss an meine Beobachtungen getraute ich mir eine Muskelcontractionstheorie vorzuführen, die leider wenig beachtet wurde. Doch will ich sie nun wieder anführen, da sie mich jetzt durch das

---

[1] Die Länge und die Spannung des Muskels, siehe *dies Achiv*. Bd. III bis V. 1893 bis 1895.

thermische Labyrinth zu führen befähigt scheint, wie sie damals, als sie zur Welt kam, mir die Schwierigkeiten des Zusammenhanges der mechanischen Verhältnisse zu entwirren geholfen hat.

Nach dieser Theorie sind die contractilen Elemente des Muskels in der Ruhe stabförmige Protoplasmabildungen, wie Engelmann's Inotagmen, welche in der Längenrichtung der Muskelfibrillen orientirt und von einer flüssigen Substanz umgeben sind. Unter dem Einflusse der Erregung „scheiden", wenn man so sagen will, diese Stäbe, wie Drüsenprotoplasma, an ihren Oberflächen einen Stoff aus, welcher von der die Stäbe umgebenden Flüssigkeit nicht so sehr „gefeuchtet" wird, wie diese Oberfläche im ruhenden Zustande. Die Cohäsion innerhalb des Stabes wird dann nicht länger von der Adhäsion der umgebenden Flüssigkeit aufgewogen; alle hervorragenden Theile des Stabes werden gegen das Centrum eingezogen, bis der Stab völlige sphärische Form angenommen hat — wenn nämlich keine mechanischen Kräfte diesen Gestaltveränderungen entgegenwirken. Wie die Gestalt des Muskelfadens und des ganzen Muskels der der contractilen Elemente folgt und sich abspiegelt, fordert keine Erläuterung. Nach dem kommt aber der zweite Act, da diese Elemente und mit ihnen der ganze Muskel wieder die längere Form annehmen. Man muss sich dann denken, dass der an der Oberfläche der Elemente bei der Erregung ausgeschiedene Stoff augenblicklich wieder entfernt wird, entweder dadurch, dass er zu seiner früheren oder zur neuen Zusammensetzung umgewandelt wird, oder dadurch, dass er in der umgebenden Flüssigkeit ganz einfach gelöst wird.

Wir haben hier also entweder, wie Fick vor mehreren Jahren, zwar aus ganz anderen Gründen, vorgeschlagen hat, zwei chemische Processe, der eine für die Contraction, der andere für die Wiederausdehnung, oder einen chemischen Process als Ausgangspunkt für die erstere und einen wesentlich physikalischen für die zweite.

Die kräftigste Stütze dieser Theorie finde ich in dem von mir in derselben Arbeit gezeigten Verhältniss, dass die Kraft des Muskels, sich bei der Erregung zu verkürzen, etwa bei der normalen Länge des Muskels ihr Maximum erreicht und, wenn man sich von dieser Länge entfernt, dadurch dass man den Muskel entweder kürzer oder länger macht, abnimmt. Sie wird Null, wenn der Muskel sich zum Maximum contrahirt hat und die contractilen Elemente die sphärische Gestalt bekommen haben oder ihr so nahe gekommen sind, wie die innerhalb des Muskels wirkenden elastischen Kräfte es gestatten. Die Muskelkraft nimmt aber auch ab, wenn die contractilen Stäbe zu viel verlängert werden, weil dann die gestaltverändernde Wirkung der Ober-

flächenspannung unter ungünstigere Bedingungen kommt.[1] Es muss nicht nur die Contractionskraft schwächer werden, auch die Zusammenziehung muss langsamer einhergehen, was genau übereinstimmt mit schon längst Gekanntem und häufig wiederholten Erfahrungen, nämlich dass bei höheren Belastungen die Zusammenziehung langsamer verläuft, wie auch der dann schnellere Verlauf der Wiederausdehnung ganz begreiflich wird. Ich kenne überhaupt keine andere Muskelcontractionstheorie, welche sich mit allen den mechanischen Verhältnissen der Muskelwirksamkeit so gut verträgt, während sie ebenso gut wie irgend eine der älteren Theorieen allen übrigen mit der Zusammenziehung verbundenen Erscheinungen sich anpasst.

Es bleibt nun übrig zu sehen, wie sie sich zur Wärmeproduction des Muskels und ihren Veränderungen unter verschiedenen Verhältnissen stellt. Die oben gezeigte und hervorgehobene nahe Verbindung zwischen Arbeit und Wärmeproduction wird verständlich durch die gar zu plausible Annahme, dass der eine der beiden Processe (die Secretion und die Entfernung des Secrets) oder möglicher Weise beide exothermischer Natur seien. Dass die Secretion wie Contraction und Wärmeproduction durch Aufspeichern von Nahrungsmaterial gefördert werden sollte und eingeschränkt, wenn dies zu mangeln beginnt, ebenso dass sie durch Wärme befördert und beschleunigt, durch Kälte vermindert und zurückgehalten werden sollte, ist völlig übereinstimmend mit unseren Erfahrungen über die chemischen Processe im Allgemeinen und ganz besonders über den biochemischen. Auch erscheint es keineswegs abschreckend anzunehmen, dass die Stärke des Erregungsantriebes den Umfang des eingeleiteten chemischen Processes einigermaassen bemisst. Dagegen treten Schwierigkeiten auf, da die äusseren Verhältnisse, die Einmischung äusserer Kräfte, an seiner Seite Platz greifen, um die Umfassung oder den Verlauf des Processes mit zu bestimmen. Gleichwohl giebt es einen Anhaltepunkt, welcher, genauer betrachtet, diese Schwierigkeiten zu lösen scheint.

Man hat die Wärmeproduction unter allerlei Variationen der äusseren mechanischen Bedingungen geprüft und verglichen. Dabei hat man vor Allem die Arbeit und Spannung des Muskels beachtet. Niemand ist auf den Gedanken gekommen, die Länge des Muskels als die Wärmeproduction zum Theil normirend zu halten.

Freilich kann man die Länge des Muskels als von Zeit, Reizung und Spannung abhängig betrachten. Aber ebenso gut kann man die

---

[1] J. Bernstein hat neulich die mathematische Begründung dieses Verhältnisses geliefert. Pflüger's *Archiv*. Bd. LXXXV. S. 300 u. f.



Spannung als von Zeit, Reizung und Länge abhängig auffassen; und ich habe in meiner oben erwähnten Arbeit gezeigt, wie dies in manchen Fällen zu vollkommener und richtiger Auffassung der mechanischen Verhältnisse bei der Muskelcontraction führt.

Andererseits scheint es mir ganz unbegreiflich, wo man den vermittelnden Uebergang für den Gedanken finden soll, wenn es gilt, die causale Verbindung zwischen der Spannung in verschiedenen Momenten der Contraction und dem Energieumsatz klar zu stellen. Mit Schenk eine hypothetische, von der Spannung abhängige Erregbarkeitsveränderung einzuschieben, vermehrt nur die Anzahl der Räthsel, ohne etwas zu erklären. Dagegen braucht man nicht viel Phantasie, um das vermittelnde Gedankenglied zwischen der Länge des erregten Muskels in jedem Momente und einen dort sich abspielenden chemischen oder physischen Process zu finden. Ich dachte mir diesen Process in der Grenzoberfläche des contractilen Elementes vor sich gehend. Was ist natürlicher, als dass der Process mit der Grösse dieser Oberfläche zu- und abnimmt. Aber die Grösse dieser Oberfläche beruht auf der Gestalt des Elementes. Sie ist am kleinsten, wenn die Elemente die sphärische Gestalt angenommen haben, und wächst, je mehr die Elemente in der Länge ausgezogen werden.

Wir wollen nun sehen, wie diese Theorie mit den Ergebnissen der Experimente stimmt. Die contractilen Elemente haben die kleinsten Oberflächen, wenn der unbelastete Muskel ad maximum contrahirt ist. Trifft ein neuer Reiz einen Muskel in diesem Zustande, dann müsste die kleinste Wärmemenge, die mit einem derartigen Reize vereinbar ist, frei gemacht werden. Das stimmt auch. Alle Erfahrung geht in diese Richtung. So hat Fick z. B. folgenden Satz geäussert: „Es ist also nunmehr als erwiesen zu betrachten, dass der Stoffwechsel, der bei gleichbleibender Länge durch einen Reiz ausgelöst wird, wenn er die Spannung erhöht, nicht sehr viel grösser ist, als wenn der Reiz bloss Erhaltung einer schon bestehenden Spannung bewirkt, während dagegen ein verkürzender (und folglich Arbeit veranlassender) Reiz einen sehr viel grösseren Stoffumsatz auslöst, als ein eine bestehende Verkürzung bloss erhaltender Reiz.“ [1]

Der unbelastete Muskel giebt beim Tetanus weniger Wärme als der belastete; er ist ja auch kürzer, und wenn man ihn belastet, wächst seine Länge, aber auch die für jeden Reizimpuls frei gemachte Wärme.

Heidenhain glaubte gefunden zu haben, dass, wenn die Spannung

[1] Myothermische Untersuchungen. S. 270.

über eine bestimmte Grenze reichte, die im Tetanus gelieferte Wärmemenge abnehmen sollte, anstatt zu wachsen, vorausgesetzt, dass der Muskel sich zu verkürzen gehindert wurde; und es liegt ja ganz nahe, dies mit dem von mir gefundenen Verhältniss, dass die Contractionskraft des Muskels über eine gewisse Grenzspannung abnimmt, zusammen zu stellen. Aber die erwähnte Beobachtung Heidenhain's hat wohl Niemand bestätigt, und meine Experimente zeigen entschieden in dieser Richtung, dass, wenn der Muskel gehindert wird, sich zu verkürzen, die Wärmeproduction mit der Muskellänge in infinitum wächst. Diese Versuche gehören übrigens nicht zu den leichtesten. Erstens kann man nicht maximale Reize brauchen, wenn man mit kräftigen Muskeln arbeitet, denn dann bersten sie, reissen sich selbst ab; zweitens wird der Muskel bei jedem Versuche gedehnt, so dass er zu Ende der Contraction eine ganz andere Spannung hat, als er vor der Contraction hatte; endlich muss man, wenn der reizende Strom durch den Muskel geführt wird, dafür Sorge tragen, dass dieser Strom nicht durch Verlängerung des Muskels geschwächt wird, da der elektrische Leitungswiderstand natürlich mit der Länge der zu durchlaufenden Muskelstrecke vermehrt wird.

Folgen die Reize einander nicht so schnell, dass sie einen glatten Tetanus erzeugen, sondern bekommt der Muskel Gelegenheit, sich zwischen den Contractionen wieder auszudehnen, dann wächst zugleich die producirte Wärme, und dies nicht nur per Reiz, sondern oft auch per Zeiteinheit gerechnet. Solche Versuche hat Fick publicirt (siehe Litteratur Nr. 14), und ich habe auch mehrmals demonstrirt, wie z. B. 9 Reize in etwa 0·4 Secunden weniger Wärme geben als 5 in derselben Zeit. Die Reize waren natürlich alle gleich kräftig und auf die Reizzeit gleichmässig vertheilt. Die Spannung wurde die ganze Zeit constant gehalten. Wie sollte man mehr augenfällig machen können, dass es nicht die Spannung, sondern die Länge ist, welche die Menge der producirten Wärme bestimmt.

Es kann auch nicht viel nützen, von der mechanischen Arbeit als für den Energieumsatz bei diesen Versuchen bestimmend zu sprechen, denn die äussere Arbeit ist ja Null während des Tetanus und bei jeder spannungslosen Zuckung („freien Zuckung") und bei jeder unverkürzten Zuckung („isometrischen Zuckung"), also in allen diesen Fällen gleich, während die Wechselungen der Wärmeproduction eine ganze Scala durchläuft.

Es ist die sog. freie Zuckung, welche die kleinste Wärmemenge abgiebt. Nun habe ich gezeigt,[1] dass jedes Hemmniss einer solchen

[1] Siehe Note 1 S. 110.

Zuckung, welches während der Verkürzungsperiode dem Muskel entgegenwirkt, wie kurz und schwach es auch sein möge, die Zuckungscurve von Hemmungspunkten unter die der freien Zuckung verlaufen lässt. Dies setzt doch voraus, dass der Längenschreiber die wirklichen Längenvariationen des Muskels getreu angiebt und nicht die Curve durch Eigenschwingungen u. s. w. verdreht, wie öfters vorkommt. Von solchen Curven hat man den Satz bekommen: „Arbeit macht Wärme", anstatt, wie es eigentlich heissen müsste: „Länge macht Wärme".

Die Sache ist nämlich die, dass, wenn man einen Muskel über eine gewisse Grenze belastet, die Contractionshöhe so schnell vermindert wird, dass auch die Zuckungsarbeit mit steigender Belastung abnimmt. Nun findet Heidenhain, dass auch die Wärmeproduction abnehmen sollte, wenn die Belastung über eine gewisse Höhe gesteigert wird, etwas früher sogar als die Arbeit. Diese Beobachtung ist doch nicht von späteren Forschern bestätigt worden, und meine Versuche geben ganz entgegengesetzte Resultate. Auch bei der Einzelzuckung wächst die Wärmeproduction wie die Länge mit der Belastung in infinitum. Denken wir uns, dass ein Muskel eine Anzahl Zuckungen so ausführt, dass sämmtliche bei derselben Muskellänge beginnen und enden, so giebt, gleich starke Reize vorausgesetzt, die Zuckung, deren Verkürzungscurve die grösste Oberfläche umschreibt, die kleinste Wärmemenge, und die Zuckung, welche die kleinste Oberfläche umschreibt, die grösste Wärmemenge. Man kann z. B. den Muskelhebel unterstützen, so dass der Muskel nicht mehr gedehnt wird, als dass sein Hebel zur Stütze hinunter reicht. Dann kann man verschiedene Gewichte zwischen Null und so grossen Massen, dass der Muskel sie nicht von der Stütze erheben kann, als Ueberlast anbringen. Oder man kann mit dem Muskel equilibrirte Massen (Schwungräder oder dergleichen Einrichtungen) verbinden, deren Trägheit der Muskel bei einer Zusammenziehung zu überwinden hat. Oder man kann noch eine Stütze anbringen — einen Ausschlag, welcher die Verlängerung des Muskels nach Belieben beschränkt. Wie viele Andere, so habe auch ich oft bestätigt, dass der Wärmeausschlag in diesen Versuchen mit der Ueberlast, mit der Trägheit der Massen und mit der Nähe des Ausschlages an der Abscisse wächst.

Aus dem hier eben Gesagten folgt nun natürlich nicht, dass Zuckungscurven, welche gleich grosse Oberflächen umschreiben, nothwendig gleich viel Wärme gebenden Zuckungen gehören. Eher sollte man warten, dass verschiedene Lagen eines Oberflächenelementes ganz verschiedenen Wärmemengen entsprächen. Auch dies lässt sich experimentell prüfen. Und aus dieser Prüfung scheint hervorzugehen, dass

die Wärmemenge, welche einer Einheit der Oberfläche entspricht, grösser wird, je näher diese Einheit an den Coordinatenaxen des Myogramms liegt, also einen je tiefer gelegenem Theil der Oberfläche, welche das Myogramm der freien oder isotonischen Zuckung umschreibt, und einem je früheren Abschnitte der Contraction sie gehört. Mit anderen Worten: die Wärmeproduction wächst mehr, wenn die Verkürzung mehr und früher gehindert wird.

Man hat ja auch längst in Frage gestellt, ob Wärme in den beiden letzten Stadien der Zuckung, dem der Verkürzung und dem der Wiederausdehnung, frei gemacht wurde. Es war besonders das letzte, was zur Debatte gebracht wurde. Giebt es im Stadium der Wiederausdehnung eine Wärmeproduction, so könnte man ja warten, dass Veränderungen in den mechanischen Bedingungen für den Verlauf dieses Stadiums auch auf die in der ganzen Zuckung producirte Wärmemenge einwirken sollte.

Diese Frage experimentell zu entscheiden ist nicht so leicht in Erwägung der Schwierigkeiten, alles Andere unverändert zu lassen und die Variationen der Versuchsbedingungen zum Stadium der Wiederausdehnung zu beschränken. Die Versuche, in welchen dies genau eingehalten wurde, sind leicht gerechnet. Man hat z. B. den Muskel an der Verkürzungshöhe belastet oder entlastet und die bei einer solchen Zuckung frei gewordene Wärmemenge mit deren Wärmequantität verglichen, welche man bekommt, wenn keine Veränderung der Belastung während der Zuckung eingeführt wurde. Es müsste aber der Muskel am Ende der Zuckungen, welche zum Vergleich kommen, dieselbe Länge haben, oder widrigenfalls durch besondere Versuche ermittelt werden, ob die Längenveränderung in diesen Versuchen einen Wärmeausschlag gegeben hat und wie gross. Dies ist ja, wie ich oben gezeigt habe, im Voraus nicht zu entscheiden.

Weiter hat man versäumt mitzurechnen, dass in den Versuchen, wo die Belastung bei der Wiederausdehnung am Muskel hängt, oft elastische Schwingungen, d. h. wiederholte Dehnungen des Muskels, entstehen, welche Dehnungen Wärme geben, wenn auch nicht viel.

Vermeidet man solche Fehler, so scheint es, aus meinen allerdings nicht zahlreichen Versuchen zu schliessen, als sollte die Wärmeproduction der Muskelzuckung von solchen Eingriffen, welche ausschliesslich den Verlauf der Wiederausdehnung berühren, keinen merklichen Einfluss erleiden. Die Menge frei gemachter Wärme sollte also, da die Verkürzung ihr Maximum erreicht hat, schon definitiv zugemessen sein und der Verlauf des absteigenden Theiles der Zuckungscurve keine Wirkung darauf ausüben.

Ein gespannter Muskel ist länger als ein ungespannter und giebt auch bei gleich starker Erregung mehr Wärme, und die Wärme wächst, wie oben gesagt wurde, mit der Belastung und Länge. Unterstützt man die Last und hebt die Stütze successive höher und höher so dass der Muskel im Anfange der Zuckungen immer kürzer und weniger gespannt wird, so wird auch die Wärme immer mehr vermindert, bis endlich die Stütze so hoch eingestellt wird, dass der Muskel gar nicht die Last angreift. Wir bekommen dann die minimale Wärmeentwickelung der freien Zuckung. Bei solchen Versuchen wird auch der Verlauf der Spannung mit der Umstellung der Stütze geändert. Doch können wir auch die Länge des Muskels verändern, ohne die Spannung wechseln zu lassen. Dies kann geschehen, wenn auch vorübergehend durch eine starke und dauernde Dehnung des ruhenden Muskels; die Wirkung wird aber nicht bedeutend. Weit mehr leistet eine andere Methode. Gesetzt, wir tragen Sorge, dass die Spannung constant bleibt (isotonische Anordnung), auch, wenn Sie wollen, Null, und dass wir zwei Reize so schnell auf einander folgen lassen, dass die erste Zuckung noch nicht zu Ende ist, wenn die zweite schon anfängt. Der Muskel ist dann im Beginne der zweiten Zuckung „selbstunterstützt" und giebt für beide Zuckungen weniger Wärme als für zwei ganz gesonderte Zuckungen. Die Untersuchungen von Schenck und Brandt (30) zeigen zumal, dass die Wärmesumme superponirter Zuckungen am kleinsten wird, wenn die zweite Zuckung eben in dem Momente anfängt, wo die erste ihren Höhepunkt erreicht hat, also wenn die „Selbststütze" am höchsten steht und der Muskel am kürzesten ist. Beginnt die zweite Zuckung früher oder später, so dass die Selbststütze tiefer eingestellt ist, so sollen zugleich grössere Wärmeausschläge entstehen.

Ich habe nicht so minutiöse Versuche ausgeführt, dass ich die Richtigkeit dieser Beobachtungen im Detail bestätigen könnte, aber die Hauptsache kann ich vollständig bezeugen, dass superponirte Zuckungen weniger Wärme geben, als ebenso viel Einzelzuckungen.

In der eben erwähnten Arbeit untersuchten die Verfasser auch superponirte Zuckungen bei isometrischer Anordnung, und ihre Experimente haben, wie meine Theorie fordert, gezeigt, dass unter solchen Umständen ein Minimum der Wärmeausschläge bei einem Reizintervalle, das der Culminationszeit der ersten Zuckung gleichkommt, nicht zu beobachten war. Alles spricht für die Bedeutung der Länge des Muskels bei der Wärmebestimmung.

In einer früher erschienenen Arbeit (28) stellt Fick neue Fragen auf. Er tetanisirt den Muskel in jedem Versuche während immer

gleicher Zeit und lässt im Tetanus bei dem einen Versuche die Belastung wachsen von Null zu einer bestimmten Grösse, bei dem anderen von derselben Grösse zu Null abnehmen. Fick findet in diesem Versuche eine grössere Wärmeentwickelung und zieht daraus seine Schlüsse über das Verhältniss der Muskelwärme zur Muskelarbeit, welche in jenen Experimenten negativ, in diesen positiv ist und sehr unbequem mit der mechanischen Wärmetheorie und anderen Theorien sich vereinbaren lassen. Die Sache hat aber kaum mit dieser Theorie zu schaffen. Es verhält sich nämlich so, dass, wenn der Muskel in ungespanntem Zustande tetanisirt und so allmählich belastet wird, er eine Dehnungscurve schreibt, welche höher verläuft, als wenn der Muskel im Voraus belastet und während des Tetanus entlastet wird. Im ersten Versuche ist der Muskel und seine contractilen Elemente (Inotagmen) überhaupt kürzer, im zweiten Versuche länger. Darum wird die Wärmemenge dort kleiner, hier grösser.

Eine ähnliche Erklärung kommt dem folgenden Experimente zu. Fick tetanisirte den Muskel während einer bestimmten Anzahl Secunden, und in dieser Zeit lässt er die Belastung continuirlich wechseln, in dem einen Versuche von Null durch ein Maximum zu Null zurück, im anderen Versuche von demselben Maximum durch Null zur Ausgangsbelastung zurück. Im zweiten Versuche bekam Fick weit mehr Wärme. Wie ich schon 1875 gezeigt habe,[1] verlaufen so geschriebene Dehnungscurven in der zweiten Versuchsform im Ganzen tiefer. Den Grund können wir hier bei Seite lassen. Aber in dieser Erscheinung und nicht anderswo sehe ich die Ursache der verschiedenen Wärmeentwickelungen.

Ich habe die Fick'schen Versuche mit grosser Sorgfalt und ziemlich zuverlässigen und einwandsfreien Einrichtungen nachgemacht und habe dabei die Richtigkeit seiner Ergebnisse völlig bestätigt. Aber ich bin auch Ausnahmen begegnet, welche die Richtigkeit meiner Auffassung noch deutlicher beweisen. Ich brauchte in einigen Experimenten der vorerwähnten Art verhältnissmässig kurzdauernde Tetani, was meine technischen Hülfsmittel vollauf gestatteten, und wodurch die Ermüdung nicht merkbar hervortrat. In einigen dieser Versuche blieb der Unterschied der Wärmeausschläge weg. Da ich nun die mit meinem Muskelindicator von dem Muskel in diesen Versuchen geschriebenen Curven ansah, war ein Höhenunterschied zwischen ihnen nicht zu bemerken. Sie deckten sich fast vollständig. Deshalb war hier ja kein Grund für verschiedene Wärmeleistung vorhanden.

---

[1] *Upsala Läkareförenings förhandlingar.* Bd. IX. S. 555.

Ich habe schon in dem historischen Theil erwähnt, dass Fick in Folge seiner jetzt berührten Ergebnisse sich eine Theorie geschaffen hat, nach welcher ein isometrischer Tetanus weniger Wärme liefern würde, als ein Tetanus mit Entlastung von derselben Ausgangslänge, aber dass seine diesbezüglichen Controlversuche nicht nach Berechnung ausfielen. Es ist leicht, die Veranlassung zu finden, und ich habe natürlich nicht versäumt, mich davon zu unterrichten, wie die Sache sich verhält. Der isometrische Tetanus giebt die meiste Wärme. Auch hier ist es die Länge des Muskels, welche für die Wärmeproduction bestimmend obenan steht.

Alle meine Versuche sind in dieser Beziehung übereinstimmend. Es giebt aber einige Versuche von Chauveau und Fick, wo der grössere Energieumsatz dem stärker contrahirten, kürzeren Muskel, wenn die Spannung gleich war, oder dem mehr gespannten Muskel, wenn die Länge gleich war, zuzukommen scheint. Aber um dieses Resultat zu erreichen, muss die Reizintensität verändert werden, und es ist natürlich immer diese, welche den Energieumsatz hauptsächlich heherrscht. Der Reiz giebt den Antrieb, der den chemischen Process einleitet, und bestimmt vor allen anderen Faktoren seine Umfassung. **Die Verkürzung wirkt auf diesen Proçess hemmend, dadurch, dass sie die chemisch thätige Oberfläche vermindert.**

Die für die Physik des Muskels neuen Ergebnisse, welche aus meinen Untersuchungen hervorgehen, können hauptsächlich in folgenden Sätzen zusammengefasst werden:

1. Die Ausschläge, welche man oft bei den Dehnungsversuchen bekommt, sind wenigstens zum grössten Theil aus Verschiebungen zwischen Muskel und Säule und aus Temperaturunterschieden zwischen diesen und innerhalb des Muskels herzuleiten.

2. Auf dieselben Ursachen sind auch die sog. paradoxen Erwärmungen, die negativen Wärmeschwankungen, verspäteten und saccadierten Ausschläge und Nachwärmungen und die negativen Ausschläge, welche unter gewöhnlichen Versuchsbedingungen bei der Zuckung entstehen, zu beziehen.

3. In dieselbe Kategorie kommen solche Ausschläge bei Zuckungs- oder Tetanusversuchen, welche eine Abnahme zeigen, wenn die Spannung über eine gewisse Grenze hinaus reicht.

4. Auch im ruhenden Zustande macht der überlebende Froschmuskel gewöhnlich Wärme frei.

5. Die Wärmeproduction und Contraction des Muskels haben dieselbe Reizschwelle. Beide nähern sich auch einem Maximum etwa bei derselben Reizstärke, und zwar dies auch bei isometrischer Wirkungsweise. Quantitativ sind die beiden Leistungen für dieselbe Reizstärke innerhalb weiter Grenzen von einander unabhängig.

6. Bei gleich starken Reizen giebt der Muskel im Verkürzungsstadium weniger Wärme, je mehr er sich zusammengezogen hat. Im Ausdehnungstadium ist die Wärmebildung wahrscheinlich von der Verlaufsform dieses Stadiums unabhängig.

Um diese und die übrigen hierher gehörigen Ergebnisse unter einen gemeinschaftlichen Gesichtspunkt zu bringen, erlaube ich mir, folgende Hypothesen aufzustellen:

1. Alles, was den durch die Reize hervorgerufenen chemischen Process hemmt, vermindert die dem Reize folgende Wärmebildung im Muskel.

2. Als hemmende Momente sind zu nennen: niedrige Temperatur, Mangel an Nahrungsvorrath, Beschränkung der bei der Arbeit chemisch wirksamen Oberfläche.

3. Die chemisch wirksame Oberfläche wird dadurch vermindert, dass die Inotagmen bei der Verkürzung des Muskels sich der sphärischen Gestalt nähern.

Nachtrag.

Nachdem das vorher Angeführte in schwedischer Sprache erschienen, habe ich ein paar Veränderungen in die Methoden eingeführt. Die eine betrifft den magnetischen Inductionsapparat, die andere die Registrirung der Galvanometerausschläge. Den Reizapparat habe ich schon oben S. 93 in seiner neuen Form beschrieben und will hier nur nach längerer Erfahrung und genauerer Prüfung seine vorzüglichen Eigenschaften hervorheben.

Die neue Registrirung der Wärmeausschläge geschieht auf photographischem Wege. Das lichtsensible Papier ist an der Trommel eines elektrisch getriebenen Kymographions gespannt, wozu neue, besondere Vorrichtungen nöthig waren. Die Trommel ist übrigens in einem lichtdichten Kasten aus Zinkblech eingeschlossen, in welchen der vom

Galvanometerspiegel reflectirte Lichtstrahl durch zwei parallele horizontale Spalten eindringen kann. Damit ist das Licht von oben und unten abgeschirmt, und nur in der horizontalen Spaltebene gelegenen Strahlenbündel können in den Kasten eindringen. Seitliches Licht ist durch schwarze Schirme abgehalten, so dass man das Zimmer nicht vollständig zu verdunkeln nöthig hat. Eine elektrische Glühlampe sendet den durch eine Sammellinse concentrirten Lichtstrahl zum Galvanometerspiegel, wo er nach dem Spalte reflectirt und dort ein Bild des glühenden Drahtes zeichnet. Der äussere Spalt kann mit einem leicht beweglichen Deckel verschlossen werden, und ein anderer Deckel schliesst lichtdicht die Oeffnung des Kastens, durch welche die Trommel eingeführt wird. Die Bewegungen der Trommel werden auch zu einem äusserlich am Deckel angebrachten Zeiger übergeführt, wodurch es möglich ist, diese Bewegungen während des Versuches zu controliren. Spiegelabstand 1 ^{m}.

Für die Muskelphysik ist durch die photographische Registrirung Neues nicht gewonnen, was auch nicht zu erwarten war. Sie giebt aber Gelegenheit denjenigen, welche meine Versuche über die Muskelwärme nicht nachprüfen können oder wollen, ein Document zu veranschaulichen, welches geeignet ist, den Werth der Methode und deren Ergebnisse zu beurtheilen.

Da ich nun solche Documente beilege (s. Taf. III), muss ich einige Erläuterungen hinzufügen. Die unter der Curve stehenden Ziffern entsprechen den Versuchsnummern in der untenstehenden Versuchstabelle, und die obenstehenden Ziffern zeigen die ungefähre Höhe der ersten Schwingung. Eine genauere Angabe dieser Höhe hat wenig Sinn, da die Magnetnadel oft noch schwang, wenn der neue Ausschlag eintrat und die Grösse der ersten Schwingung dann zum Theil von der Schwingungsphase abhängt, von welcher sie ausgegangen ist. Ein Blick auf die Curve zeigt zugleich, in welcher Richtung die ausgeschriebene Höhe zu corrigiren ist.

Aus dem Versuchsprotokolle.

Zu Curve I: Versuch vom 9. Juli 1900. Präparat aus einer kleinen Temporaria; Indicatorversuch; Magnetinductorium.

Nach einer langen Versuchsserie wurde der Registrircylinder auf schnelleren Lauf eingestellt und folgende Versuche gemacht.

Versuchs-Nummer	Anzahl d. Reize	Reizstärke	Spannung g	Erste Schwing. Millim.	Anmerkungen
1	1	maximal	50 isoton.	2·5	
2	2	„	50 „	5	
3	3	„	50 „	7	
4	1	„	50 „	2	
5	1	„	50 „ *	2	* mit nachfolgend. Entlastung.
6	1	„	0—50—0*	3·5	* Ueberlastungszuckung
7	2	„	0—50—0	6	

Spalt einen Augenblick geschlossen.

8	3	maximal	0—50—0	7·5	
9	—	—	0—50—0*	—	* Belastung u. Entlastung des ruhenden Muskels.
10	1	„	0—50—50	4·5	
11	3	„	50 isoton.	7	
12	—	—	Entlastung	—	
13	1	maximal	0 isoton.	2	
14	3	„	0 „	5·5	

Zu Curve II. Versuch vom 10. Juni 1900. Präparat von neugefangener sehr kleiner Temporaria. Indicator; Magnetinductorium.

8[1]	1	maximal	0—25—0	6	
9	1	„	0—25—0	6·5	
10	2	„	0—25—0	15·5	
11	1	„	0	6·5	
12	2	„	0	11·5	
13	—	—	0—25*	+ ?	* Belast. d. ruhenden Muskels.
14	—	—	25—0	— ?	

Spalt einige Secunden geschlossen.

15	—	—	0—50	+ ?	
16	1	maximal	50 isoton.	10·5	
17	2	„	50 „	19·5	
18	2	stärker	50 „	19·5	
19	1	„	50 > 0* 50	9	* Entlastung nicht vollständig.
20	1	„	> 0 50 > 0*	10·5	* Ueberlast nicht vollst. unterst.
21	1	„	0 50 > 0*	9	* Ueberlast höher unterstützt.
22	1	„	0—50—0	5·5	
23	2	„	0—50—50*	11·5	* Gegen Ende des Verkürzungsstadiums angehängt.
24	—	—	Entlast. —0	— ?	
25	2	„	0 0 0	10	
26	—	—	Belast. —50	+ ?	

[1] In Versuch 1 bis 7 wurden die Ausschläge nicht registrirt.

(Fortsetzung.)

Zu Curve III: Versuch vom 19. Juni 1900. Temporaria; Magnetinductorium.

Versuchs-Nummer	Anzahl d. Reize	Reiz-stärke	Spannung g	Erste Schwing. Millim.	Anmerkungen
1	—	—	0—25	—	
2	1	30[1]	25—?—25	—	keine Zuckung.
3	1	32	"	—	" "
4	1	34	"	2	Zuckung.
5	1	36	"	4	"
6	1	38	"	4	"
7	1	40	"	5	"
8	1	45	"	5·5	
9	1	50	"	5·5	
Spalt einen Augenblick geschlossen.					
10	2^{1}[2]	50	25—?—25	8·5	
11	2^2	50	"	10	
12	2^3	50	"	10·5	
13	2^4	50	"	11	
14	2^5	50	"	11·5	
15	2^6	50	"	10·5	
16	2^{11}	50	"	10	
17	2^{16}	50	"	10·5	
Spalt geschlossen — Cylinder verschoben.					
18	2^1	50	25—?—25	8	
19	1	50	"	5	
20	3^1	50	"	10·5	
21	3^2	50	"	12	
22	3^3	50	"	12	
23	3^4	50	"	15	
24	3^5	50	"	16	
25	3^6	50	"	15	
26	13^1	50	"	21	
27	7^2	50	"	18	
28	4^4	50	"	18	
29	1	50	"	5	

[1] Die Reizstärke wächst mit den Zahlen dieser Spalte.
[2] Der Exponent deutet die Zeit zwischen den Reizen (in etwa 0·02 Sec.) an.

(Fortsetzung.)

Versuchs-Nummer	Anzahl d. Reize	Reiz-stärke	Spannung g	Erste Schwing. Millim.	Anmerkungen
			Spalt geschlossen.		
30	—	—	25—0	—	
31	1	50	0	3	
32	—	—	0—50	—	
33	1	50	50—50—50	5·5	
34	1	50	50—50—0	4	
35	1	50	0—50—0	5	
36	1	50	0—50—50	6·5	
37	1	50	50—50—50	6	
			Zu Curve IV: Versuch vom 15. December 1900:		
5	1	30	50 isoton.	10·5	Zuckung.
			Spalt geschlossen.		
6	1	40	50 isoton.	12	
7	1	40	50 isometr.	19	
8	2	40^{1}	50 isoton.	22·5	
9	2	40^{1}	50 isometr.	27·5	
10	2	40^{2}	50 isoton.	22·5	
11	2	40^{2}	50 isometr.	29	
12	2	40^{3}	50 isoton.	25	
13	2	40^{3}	50 isometr.	29·5	
14	2	40^{5}	50 isoton.	26	
15	2	40^{5}	50 isometr.	37·5	
16	2	40^{9}	50 isoton.	25·5	
17	2	40^{9}	50 isometr.	35·5	
18	3	40^{9}	50 isoton.	36	
19	3	40^{9}	50 isometr.	50	
20	3	40^{1}	50 isoton.	26	
21	3	40^{1}	50 isometr.	25	

Litteratur.

1. Bunzen, Beitrag zu einer künftigen Physiologie. Kopenhagen 1805. Ref. in Gilbert's *Ann. d. Phys.* Bd. XXV. S. 157.

2. Becquerel et Breschet, Premier memoire sur la chaleur animale. *Ann. des sciences naturelles.* II. 3. Zoologie. 1835. p. 257. — Second memoire etc. — Ibid. II. 4. p. 243. — Sur la chaleur animale — ibid. III. p. 257.

3. Helmholtz, H., Ueber die Wärmeentwickelung bei der Muskelaction. Müller's *Archiv.* 1848. S. 144.

4. Sur les phénomènes physiques de la contraction musculaire. (Extrait d'une Lettre de M. Matteucci à M. Depretz). *Compt. rend.* XLIII. p. 1053.

5. Beclard, De la contraction musculaire dans ses rapports avec la temperature animale. *Arch. gén. de médic.* 1861.

6. Solgers, Edw., De musculi calore, Vratislaviae, 1862, und Studien des physiol. Instit. zu Breslau. II, 125. Referat nach Heidenhain. S. Nr. 8 in dieser Aufzeichnung.

7. Meyerstein und Thiry, *Gött. Anz.* vom 28. Jan. 1863, und Henle und Pfeufer's *Zeitschrift.* XX. 45. Referat nach Heidenhain.

8. Heidenhain, R., *Mechanische Leistung, Wärmeentwickelung u. Stoffumsatz bei der Muskelthätigkeit.* Leipzig 1864.

9. Dupuy, Paul, De la contraction musculaire dans ses rapports avec la chaleur animale. *Gaz. méd. de Paris.* 1865. p. 626 und 646.

10. Westermann, H., Ein Beitrag zur Physik des Muskels. Dorpat 1868. *Diss.*

11. Valentin, G., Untersuchungen über Pfeilgifte, erste Abh. Wärme der Muskeln. Pflüger's *Arch.* Bd. I. 457.

12. Experimenteller Beitrag zur Lehre von der Erhaltung der Kraft bei der Muskelzusammenziehung. *Unters. aus dem physiol. Laborat. d. Züricher Hochschule.* Herausgeg. von A. Fick. Wien 1869. Nr. 1, und in *Myotherm. Untersuchungen aus den physiol. Laboratorien zu Zürich u. Würzburg* herausg. von A. Fick. Wiesbaden 1889. S. 35.

13. Heidenhain, R., Ueber Ad. Fick's experimentellen Beweis für die Gültigkeit des Gesetzes von der Erhaltung der Kraft bei der Muskelzusammenziehung. Pflüger's *Archiv.* 1869. Bd. II. S. 423.

14. Fick, A., Die Wärmeentwickelung bei der Zusammenziehung des Muskels. Beiträge zur Anatomie und Physiologie als *Festgabe* für Carl Ludwig zum 15. October 1874 gewidmet von seinen Schülern, sammt *Myothermische Untersuchungen* S. 88.

15. Steiner, J., Ueber die Wärmeentwickelung bei der Wiederausdehnung des Muskels. Pflüger's *Archiv.* 1875. Bd. XI. S. 196.

16. Nawalichin, J., Myothermische Untersuchungen. Pflüger's *Archiv.* 1877. Bd. XIV. S. 293.

17. Fick, A., Ueber die Wärmeentwickelung bei der Muskelzuckung. Pflüger's *Archiv.* 1879. Bd. XVI. S. 58, und *Myotherm. Unters.* S. 102.

18. Danilewsky, B., Thermodynamische Untersuchungen am Muskel. Pflüger's *Archiv.* Bd. XXI. 1880. S. 129, und *Myotherm. Unters.* S. 132 (mit einer anderen Ueberschrift und einem Nachtrage unter dem Titel: Ergebnisse weiterer thermodynamischer Untersuchungen der Muskeln).

19. Meade-Smith, Die Temperatur des gereizten Säugethiermuskels. *Arch. f. Anat. u. Physiol.* Physiol. Abth. 1881. S. 102.

20. Blix, Magnus, Till belysning af frågan: huruvida värme omsättes till mekaniskt arbete vid muskelkontraktionen. *Upsala Läkareförenings Förhandlingar.* 1881. Bd. XIV. 8; *Zeitschr. f. Biol.* Bd. XXI. N. F. III. *Myotherm. Unters.* S. 175.

21. Fick, A., Myothermische Fragen und Versuche. *Verhandl. d. physik.-medic. Gesellsch. zu Würzburg.* N. F. 1884 Bd. XVIII.; *Myotherm. Unters.* S. 249.

22. Meade Smith, R., Die Wärme des erregten Säugethiermuskels. *Arch. f. Anat. u. Physiol.* Physiol. Abth. 1884. S. 262.

23. Fick, A., Versuche über Wärmeentwickelung im Muskel bei verschiedenen Temperaturen. *Verhandl. der physik.-medic. Gesellschaft zu Würzburg.* N. F. 1885. Bd. XIX.

24. Mosso, Ugolino, Influence du système nerveux sur la temperature animale. *Arch. ital. de biol.* VII. 2. p. 306.

25. Lukjanow, S. M., Wärmelieferung und Arbeitskraft des blutleeren Säugethiermuskels. *Arch. f. Anat. u. Physiol.* Physiol. Abth. 1886. S. 117.

26. Starke, Paul, Arbeitsleistung und Wärmeentwickelung bei der verzögerten Muskelzuckung. *Abhandl d. math.-physik. Classe d. Kgl. Sächs. Ges. d. Wiss.* 1890. Bd. XVI. Nr. 1.

27. Chauveau, *Le travail muscul. et l'energie qu'il représente.* Paris 1891.

28. Schenck, Fritz, Ueber den Einfluss der Spannung auf die Wärmebildung des Muskels. Pflüger's *Archiv.* 1892. Bd. LI. S. 509.

29. Fick, A., Neue Beiträge zur Kenntniss von der Wärmeentwickelung im Muskel. Pflüger's *Archiv.* 1892. Bd. LI. S. 541.

30. Schenck, Fritz, und Brandt, Gustav, Ueber Wärmebildung bei summirten Zuckungen. Pflüger's *Archiv.* 1893. Bd. LV. S. 143.

31. Metzner, Rudolf, Ueber das Verhältniss von Arbeitsleistung und Wärmebildung im Muskel. *Arch. f. Anat. u. Physiol.* Physiol. Abth. 1893. Suppl. S. 74.

32. Fick, A., Abhängigkeit des Stoffumsatzes im tetanisirten Muskel von seiner Spannung. Pflüger's *Archiv.* 1894. Bd. LVII. S. 65.

33. Schenck, Fr., Ueber die Wärmeentwickelung des thätigen Muskels bei verschindenen Temperaturen. Pflüger's *Archiv.* 1894. Bd. LVII. S. 572.

34. Greife, Hermann, Ueber den Einfluss der Reizstärke auf die Wärmeentwickelung im Tetanus. Pflüger's *Archiv.* 1895. S. 111.

35. Cremer, M., Ueber neurothermische Versuche am marklosen Nerven. *Sitzungsber. d. Gesellsch. f. Morphol. u. Physiol. in München.* 1896. Heft II.

36. Chauveau, A., Methode nouvelle pour s'assurer si, dans les milieux vivants comme dans le monde inanimé, le travail positif »prend« de l'energie au moteur et si le travail négatif lui en »donne«. *Arch. de Physiol. normale et pathologique.* Avril 1897. T. IX. No. 2. p. 261.

Erklärung der Abbildungen.

(Tafel I—III.)

Tafel I.

Fig. I. Differentialcalorimeter für Muskeln.
„ II. Details des Inneren.
„ III. Magnetinductorium (grosses).
1 Magnet.
2 Inductionsrollen.
3 Polstücke.
4 Scheibe an der Axe des Federmyographs.
5 Eisennägel in ihren Rand eingeschraubt.

C Equipage zur Aufstellung *C*, bestehend aus Spiegel und Bügel, dieser aus Kupfer und Constantan (schwarz gezeichnet).

D Equipage zur Aufstellung *D*, bestehend aus Spiegel und zusammengebogenem Kupferdraht, dessen Enden mit Constantan oder Wismuth verbunden sind und mit einem Stück Ebonit auseinander gehalten werden.

E Details der Aufstellung *E* zeigend.
4 Die Löthstelle.
12 Die stützende Brücke.
11 Isolirende Zwischenlage.
7 Stäbe, mit welchen die Muskeln fixirt werden.
9 Schraube, um diese Stäbe festzuhalten.
10 Decke der Muskelkammer zugleich Boden des Galvanometers.

F Details der Aufstellung *F*, Façade und Seitenansicht.
1 Spiegel.
2 Magnetsystem.
3 Thermorollen.
4 Thermoelemente.
5 Stäbe zur Befestigung der
6 Ebonitlamelle, an deren Rande die Muskeln reiten.
7 Einrichtung, um die Symphyse zu befestigen.
8 Bleche, durch welche die Reizströme zugeleitet werden.
9 Zuleitungsklemmen.
10 Ebonitplatte.

Tafel II.

Fig. IV. Magnetinductorium (kleines).
a Kurbel.
b Armatur oder Anker.
r Inductionsrollen.

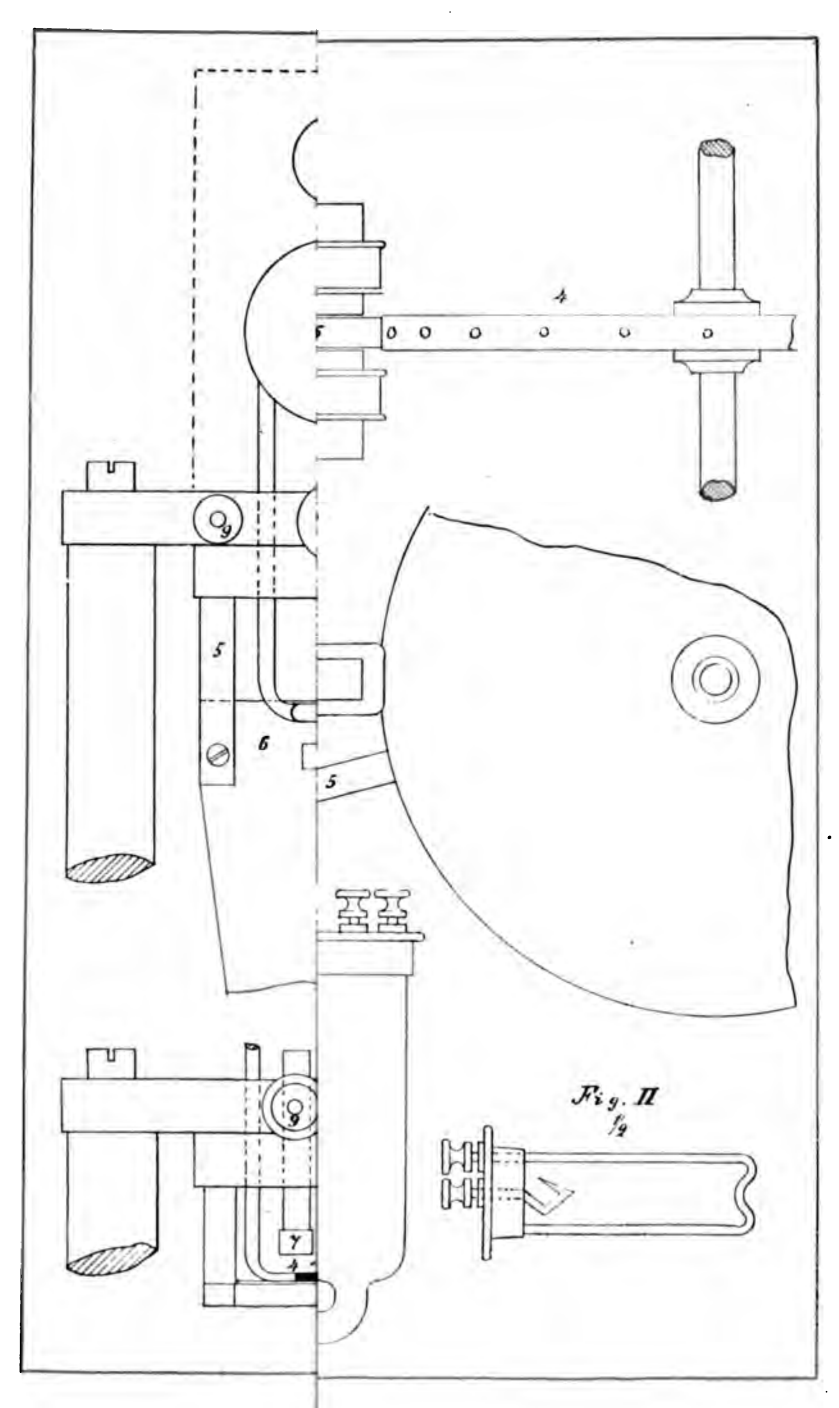
G Aufstellung *G*. Durchschnitt.
1 Spiegel
2 Magnetsystem in seiner Röhre.
3 Thermorollen.
4 Element.

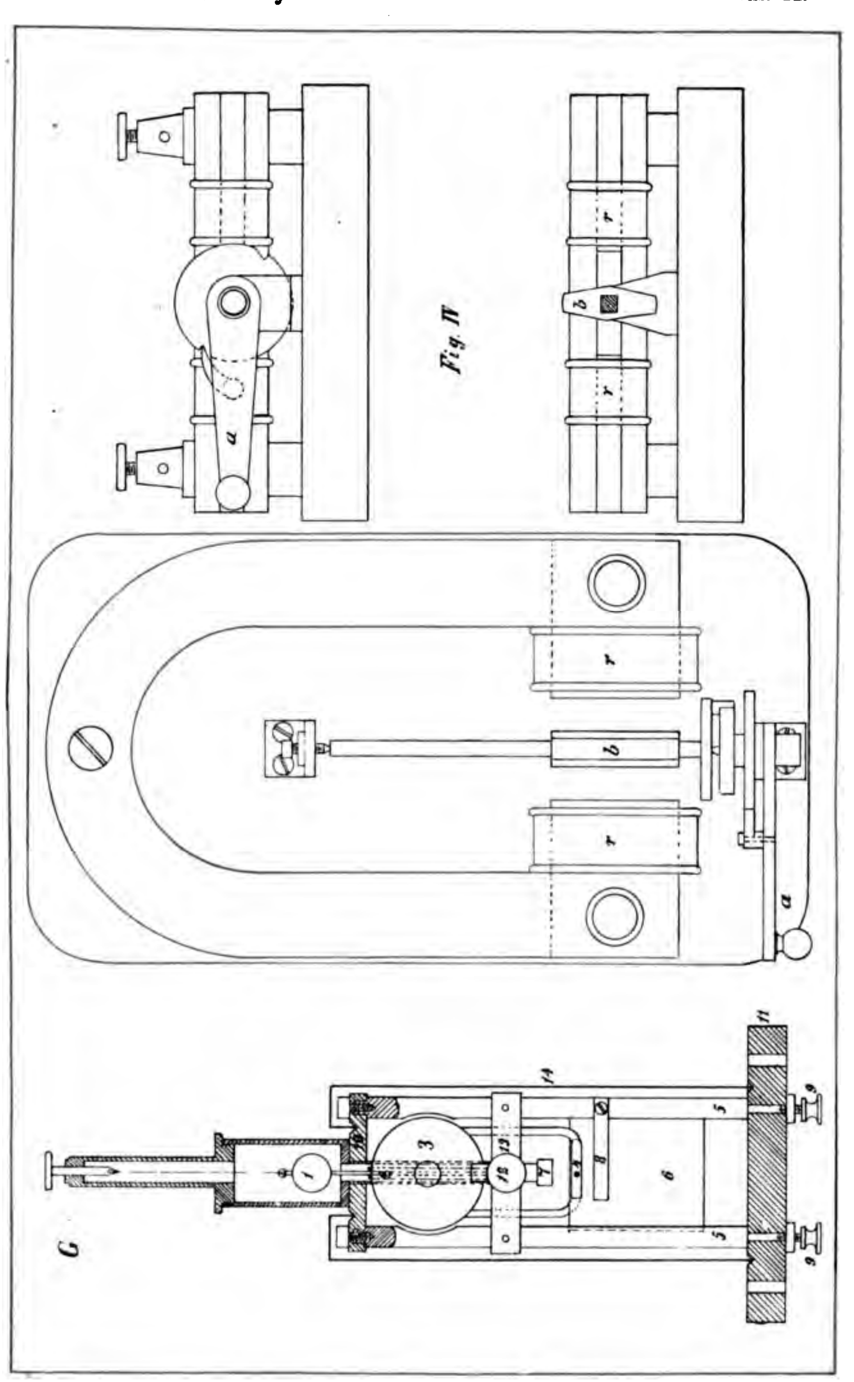
5 Pfeiler aus Messing.
6 Celluloidlamellen zwischen den Muskeln.
7 Einrichtung, die Symphyse festzuhalten.
8 Blech für die Leitung der Reizströme.
9 Klemmschrauben für dieselbe.
10 Obere Ebonitscheibe.
11 Bodenplatte.
12 Schraube zur Fixirung des Stabes 7.
13 Balken aus Ebonit.
14 Cylindrische Seitenwand aus Metall.

Tafel III.

Curve I bis IV. Photographische Aufzeichnungen der Galvanometerausschläge bei den S. 122 bis 124 protokollirten Versuchen.

Die Curve Fig. 8 ist von rechts zu lesen.


4
5
9
5
6
5
9
7
4
Fig. II
1/2



Verlag von VEIT & COMP. in Leipzig.

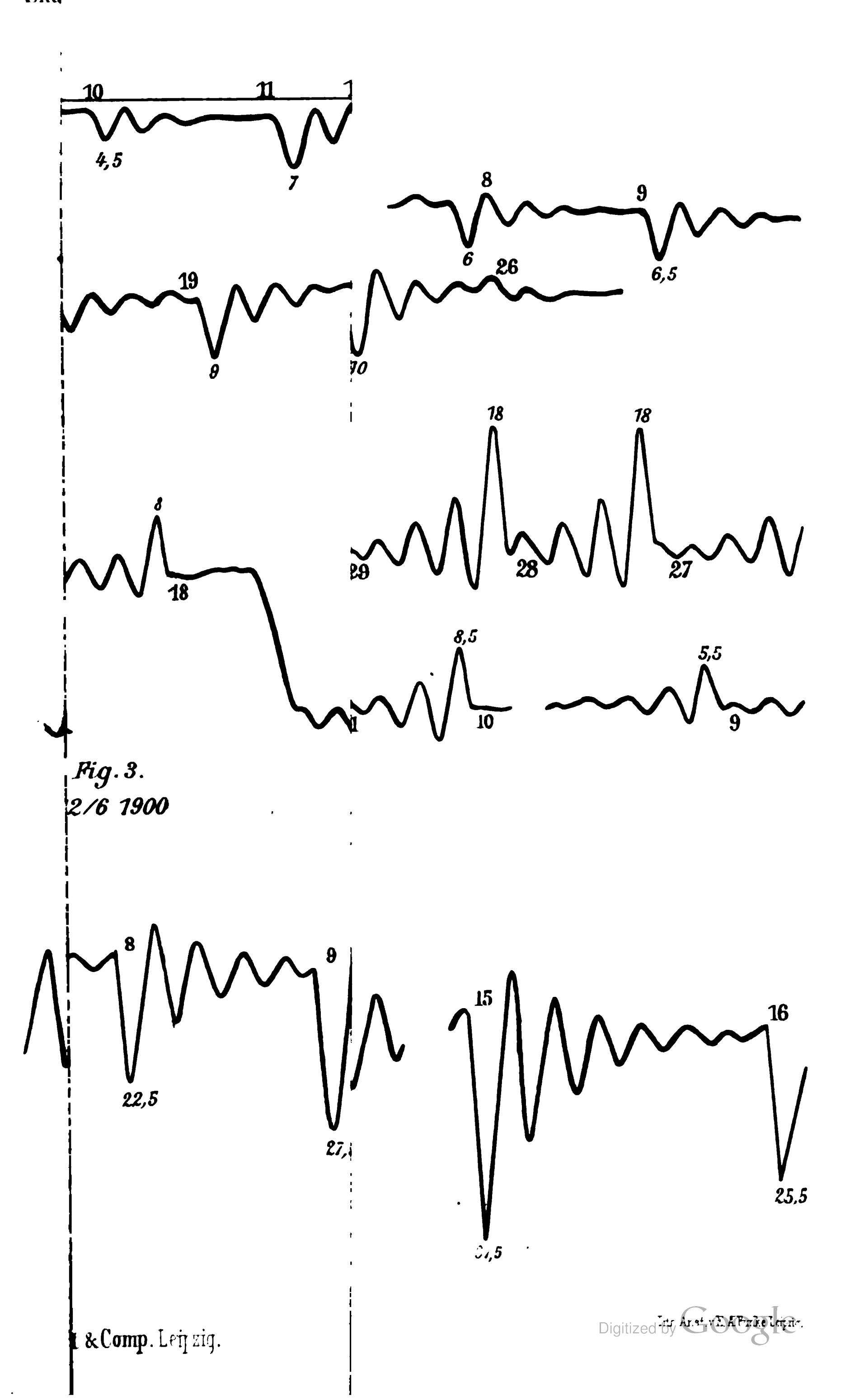


Fig. 3.
2/6 1900

& Comp. Leipzig.

Analyse von Muskelcurven.[1]

Von

K. Hällstén.[2]

Ein Muskel sei, in verticale Lage gestellt, am oberen Ende befestigt, das untere Ende sei frei, aber belastet. Bei Contraction des Muskels wird dann die Belastung oder — wie wir im Folgenden sagen — das bewegliche System in Bewegung gesetzt. Zuerst widmen wir der Bewegung des Systems unsere Aufmerksamkeit, um zu untersuchen, welche mechanischen Verhältnisse des Muskels damit im Zusammenhange stehen.

I. Die Bewegung des Systems.

Neben dem Muskel wirke nur die Schwere auf das System ein. Wir unterscheiden hier zwei Fälle: das bewegliche System ist 1. frei, nur am unteren Ende des Muskels befestigt, und 2. drehbar um eine horizontale Axe. Die Anordnung 1. ist die einfachere und lässt schon die Verhältnisse, die hier hervortreten, übersehen; wir behandeln daher diesen Fall zuerst. Die Anordnung 2 ist die bei empirischen Untersuchungen beinahe ausschliesslich verwendbare und angewandte; diesem Falle widmen wir daher in der Folge grössere Aufmerksamkeit.

1. Ein Gewicht wird vom Muskel gehoben.

1) Die Gleichung der Bewegung des Systems. Die Muskelkraft. Die Kräfte, die auf das System einwirken, sind das Gewicht desselben und die Muskelkraft; jenes wird gemessen vom Producte der Masse M des Systems und der Beschleunigung der Schwere g, also von Mg; diese, die eine mit der Zeit t veränderliche Grösse ist,

---

[1] Der Redaction am 25. Mai 1901 zugegangen.

[2] Nach dem in *Act. Soc. Sc. Fenn.* 1897. Tom. XXIV. No. 1 und 1900. XXIX. No. 5 veröffentlichten schwedischen Originale frei referirt.

bezeichnen wir überall in der Folge mit Q. Diese Kräfte wirken in derselben Verticale, aber nach entgegengesetzten Richtungen; wird daher die Muskelkraft, die nach oben wirkt und auch im Anfange der Muskelcontraction die grössere ist, positiv genommen, so ist die Resultante der beiden Kräfte

$$Q - Mg.$$

Wenn man weiter die Grösse der Verkürzung des Muskels in derselben Zeit t, z. B. vom Anfange der Muskelcontraction gerechnet, mit s bezeichnet, so bezeichnet s zugleich die Wegstrecke, um welche das System oder ein Punkt desselben, wir nehmen an, der Massenmittelpunkt, zur Zeit t erhoben ist. Die Geschwindigkeit und die Beschleunigung des Massenmittelpunktes sind dann bestimmt durch die Differentialquotienten nach der Zeit t:

$$\frac{ds}{dt} \text{ und } \frac{d^2 s}{dt^2}.$$

Damit kann die Kraft, die auf das System einwirkt, auch durch $Md^2 s/dt^2$ ausgedrückt werden. Beide Ausdrücke für dieselbe Kraft geben daher die Gleichung:

(1) $$M\frac{d^2 s}{dt^2} = Q - Mg,$$

dies ist die Bewegungsgleichung des Systems.

Die vorige Gleichung giebt

(2) $$Q = Mg + M\frac{d^2 s}{dt^2},$$

wovon also die Grösse der Muskelkraft Q zur Zeit t bestimmt werden kann, wenn die Constante M des Systems und die Beschleunigung desselben $d^2 s/dt^2$ im betreffenden Augenblicke t bekannt sind.

2) Die Verkürzung des Muskels, ihre Geschwindigkeit und Beschleunigung zur Zeit t. Mit s wurde soeben die Verkürzung des Muskels zur Zeit t bezeichnet, dann bezeichnete ds/dt die Geschwindigkeit, mit welcher ein Punkt des Systems sich bewegt, selbstverständlich unter der Voraussetzung, dass keine Schleuderung des Systems vorkommt; der Muskel und das System sind aber mit einander durch einen Draht vereinigt; jeder Punkt des Drahtes hat daher auch dieselbe Geschwindigkeit ds/dt, und ebenso das sehnige Ende oder das Beinstück, an welchem der Draht vermittelst eines Hakens befestigt ist. Der Coëfficient ds/dt bestimmt daher auch die Geschwindigkeit, mit welcher das untere, freie Ende des Muskels zur Zeit t gegen das obere, befestigte Ende des Muskels bewegt wird.

Ganz in derselben Weise bestimmt der Coëfficient $d^2 s/dt^2$ auch die Beschleunigung für die letztgenannte Bewegung.

3) Die mechanische Energie, die der Muskel während der Contraction dem Systeme bis zur Zeit t mitgetheilt hat, wird analytisch bestimmt, wenn die Gleichung (2) mit ds multiplicirt wird; diese Grösse bezeichnet nämlich die elementare Wegstrecke oder Verschiebung des Systems im nächsten Zeitelement dt in derselben Verticale, in welcher die Kraft Q wirkt; das Product $Q.ds$ im linken Gliede der Gleichung bezeichnet daher die elementare mechanische Energie dE, die der Muskel während der Zeit dt dem Systeme mitgetheilt hat. Die Gleichung der elementaren Energie dE zur Zeit t wird also

(3) $$Q\,ds = dE = Mg\,ds + M\frac{d^2 s}{dt^2}ds\ ,$$

wovon durch Integration zwischen den Grenzen s gleich Null und gleich s hervorgeht:

(3a) $$\int_0^s Q\,ds = E = Mgs + M\frac{v^2}{2}\ ; \quad \text{wo:} \quad v = \frac{ds}{dt}\ ,$$

weil:

$$\frac{d^2 s}{dt^2}ds = \frac{d\left(\frac{ds}{dt}\right)}{dt}ds = dv.v = d\left(\frac{v^2}{2}\right)\ .$$

Der Kürze wegen ist hier die Geschwindigkeit ds/dt mit v bezeichnet. Diese Gleichung (3a) drückt nur aus, dass die ganze mechanische Energie E (gerechnet vom Anfange der Contraction bis zur Zeit t, wenn die Verkürzung des Muskels den Werth s hat), die der Muskel dem Systeme mitgetheilt hat, aus zwei Theilen zusammengesetzt wird, nämlich von der Arbeit Mgs in Beziehung zur Anfangslage, und der Bewegung oder der lebendigen Kraft $Mv^2/2$ zur Zeit t — eine Thatsache, die sozusagen selbstverständlich ist; diese beiden Summanden und damit die ganze Energie E können vermittelst dieser Gleichung (3a) berechnet werden, wenn die Verkürzung s und die Geschwindigkeit v nebst der Constante M des Systems bekannt sind.

4) Einige specielle Werthe der Muskelkraft und der Energie mögen hier noch berücksichtigt werden. In der Anfangslage, wenn der Muskel noch in Ruhe ist, ist die Verkürzung s gleich Null, also auch

$$\frac{d^2 s}{dt^2} = 0\ ,$$

und daher nach Gleichung (2):

(4a) $$Q = Mg = Q_1\ ,$$

wo also Q_1 den anfänglichen Werth der Muskelkraft bezeichnet, mit anderen Worten: die Kraft, mit welcher der Muskel das Gewicht Mg trägt, oder auch das Gewicht, das den Muskel spannt.

Denselben Werth Q_1 erhält die Muskelkraft wieder während der Contraction in einem bestimmten Augenblicke, dann nämlich, wenn in der Gleichung (2) der Coëfficient $d^2 s / d t^2$ gleich Null wird, also

$$\text{(4 b)} \qquad \frac{d^2 s}{d t^2} = 0 \, .$$

Zwischen diesen beiden Werthen Q_1 erhält die Muskelkraft einen maximalen Werth Q_m, weil sie — der Erfahrung gemäss — erst zu-, dann abnimmt. Als Bedingung dafür giebt Gleichung (2)

$$\text{(4 c)} \qquad \frac{d Q}{d t} = 0; \quad \text{oder:} \quad \frac{d^3 s}{d t^3} = 0 \, ,$$

womit ausgedrückt wird, dass in diesem Augenblicke oder in dieser Lage des Systems der Coëfficient $d^2 s / d t^2$ einen maximalen Werth $(d^2 s / d t^2)_m$ annimmt, weil auch der Coëfficient $d^2 s / d t^2$ erst zu-, dann abnimmt. Zur selben Zeit erhalten also Q und $d^2 s / d t^2$ die maximalen Werthe Q_m und $(d^2 s / d t^2)_m$.

Hört der Muskel auf, auf das System zu wirken, so giebt die Gleichung (2):

$$\text{(4 d)} \qquad Q = 0; \quad Mg + M \frac{d^2 s}{d t^2} = 0 \; ; \quad \text{also:} \quad \frac{d^2 s}{d t^2} = -g \, .$$

So lange dies dauert, wird die Energie E des Systems nicht verändert; nach Gleichung (3 a) ist also:

$$\text{(4 e)} \qquad E = Mgs + M \frac{v^2}{2} = \text{Const.} \, ,$$

wenn nämlich die Versuche so ausgeführt werden können, dass kein Energieverlust in Folge von Hindernissen eintritt.

Diese Untersuchung zeigt, dass gewisse mechanische Verhältnisse, die in Beziehung zu der Muskelwirksamkeit stehen, vermittelst der in Rede stehenden Methode quantitativ für eine beliebige Zeit t bestimmt werden können, nämlich: die Muskelkraft, die Verkürzung des Muskels sammt ihrer (oben definirten) Geschwindigkeit und Beschleunigung, und die mechanische Energie, die der Muskel bis zur Zeit t dem System mitgetheilt hat. Zu diesem Zweck muss aber die Bewegung des Systems in Beziehung auf Lage, Geschwindigkeit und Beschleunigung bei derselben Zeit, und noch die Masse derselben bekannt sein. Die letztgenannten veränderlichen Grössen sind in jedem Falle von

der Muskelcurve herzuleiten, und in dieser Beziehung giebt es eine allgemeine Methode; die Lage s des Systems ist an der Curve für gleiche Zeitintervalle zu messen, und dann sind die Werthe von ds/dt und d^2s/dt^2 vermittelst numerischer Interpolation zu berechnen. Zur Ausführung solcher Messungen ist jedoch die in Rede stehende Anordnung der Versuche nicht recht anwendbar; das Gewicht, an welchem auch der Schreibarm zum Verzeichnen der Curve befestigt sein muss, wird nämlich bei den Versuchen in Bewegung gesetzt — nicht nur in der Richtung der Verticale, sondern auch nach den Seiten hin, daher wird die Curve fehlerhaft. Hierzu kommt noch, dass bei dieser Anordnung leicht Schleuderung des Systems eintritt; in welchem Punkte der Curve dies geschieht, davon kann wohl die letzte, oben angeführte Gleichung (4e) Auskunft geben; so lange aber ein solcher Zustand währt, giebt die Curve keine Auskunft in Beziehung auf das Verhalten des Muskels. Die theoretische Untersuchung dieser Anordnung zeigt aber in einfachster Weise, was überhaupt die in Rede stehende Methode geeignet ist, kund zu geben, denn — wie schon hier erwähnt werden mag — die Resultate werden dieselben, auch wenn das bewegliche System um eine horizontale Axe gedreht wird; nur die Berechnungen werden verwickelter.

2. Das bewegliche System wird um eine horizontale Axe gedreht.

5) Anordnungen in Beziehung auf das bewegliche System und die Versuche. Bei dieser Anordnung wird das bewegliche System im Allgemeinen aus zwei Theilen zusammengesetzt, nämlich von einem Theil, der an der Drehungsaxe unbeweglich befestigt, und von einem Loth, das nur vermittelst eines Drahtes mit diesem vereinigt ist. Das Loth hat bekanntlich den Zweck, Schleuderung des Systems während der Muskelzuckung zu vermeiden; der Draht ist daher am Umfange einer kleinen Rolle befestigt, welche die Drehungsaxe des beweglichen Systems zur Axe hat und damit fest vereinigt ist. — Zuerst mag hier angenommen werden, dass das Loth fortgelassen ist.

Die unbeweglich mit der Axe vereinigten Theile des Systems sind so angeordnet, dass das Trägheitsmoment derselben in Beziehung zur Drehungsaxe in jeder Lage des Systems denselben Werth hat; das System ist weiter in zwei symmetrische Hälften in Beziehung zu einer (idealen) Ebene, die durch den Massenmittelpunkt desselben und die Drehungsaxe geht, getheilt; in dieser Ebene ist auch die Schreibspitze zum Vorzeichnen der Muskelcurve gestellt. Bei Ausführung der physiologischen Versuche wird die so definirte Ebene in horizontale Richtung

unter den Muskel gestellt, und bestimmt dann das, was wir in der Folge die Anfangs- oder Initiallage des Systems nennen, von welcher aus die Drehung in Folge der Muskelcontraction erfolgt. Jede andere Lage, die diese Ebene während der Verkürzung des Muskels einnimmt, nennen wir eine Secundärlage.

6) Die Bewegung des Systems. Für ein System, dass um eine Achse mit veränderlicher Winkelgeschwindigkeit ω gedreht wird, gilt der bekannte Satz:

$$\omega' = \frac{D}{T}, \tag{5}$$

wo ω' die Winkelbeschleunigung und D die Summe der Drehungsmomente bei einer bestimmten, aber beliebigen Zeit t bezeichnet, und T das Trägheitsmoment ist; alle Momente sind hier in Beziehung zur Drehungsaxe zu nehmen. Die Lage des Systems zur Zeit t werde bestimmt vermittelst des Winkels φ zwischen der oben definirten Ebene in einer Secundärlage und der durch die Drehungsaxe nach unten gezogenen Verticale; dann sind

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}; \quad \text{und} \quad \frac{d\omega}{dt} = \omega' = \frac{d^2\varphi}{dt^2}. \tag{6}$$

Weiter ist die Summe der Drehungsmomente D zusammengesetzt von dem Momente der Muskelkraft Q und dem der Schwere; jenes kann mit Qq bezeichnet werden, wenn q der senkrechte Akstand der Muskelkraft von der Drehungsaxe bei der Lage φ oder zur Zeit t ist. Dieses kann durch $Mga \sin\varphi$ ausgedrückt werden, wo M als die im Systeme wirksame Masse, a als der Abstand des Massenmittelpunktes von der Drehungsaxe, und somit $a \sin\varphi$ als der Momentarm bei der Lage φ des Systems betrachtet werden kann.

Es mag hier bemerkt werden, dass M jedoch nicht die ganze Masse und Mg nicht das ganze Gewicht des Systems, sondern nur den Theil desselben, der im Producte Ma, bezw. Mga enthalten ist, bezeichnet. Das System erstreckt sich nämlich immer nach allen Richtungen von der idealen Drehungsaxe; daher entstehen Massen- oder Gewichtsmomente, die in entgegengesetzten Richtungen wirken, und somit theilweise einander aufheben. Die Grösse Ma bezieht sich also nur auf die nicht equilibrirten Drehungsmomente des Systems. Hieraus geht hervor, dass im Ausdrucke Ma die Grösse M vermittelst der Waage nicht bestimmt werden kann; ebensowenig kann die Grösse a bestimmt werden; im Folgenden ist es auch nur das Product Ma, dessen Werth es hier nöthig ist zu kennen.

Die Grösse Ma oder Mga ist hier eine Constante und bezeichnet

das Massen-, bezw. das Gewichtsmoment des Systems, wenn der Winkel φ ein rechter oder gleich $\pi / 2$ ist, was in der oben definirten Anfangslage des Systems eintrifft.

Die beiden Drehungsmomente Qq und $Mga \sin\varphi$, die also die Summe D in der vorigen Gleichung (5) bilden, wirken in entgegengesetzten Richtungen; wird daher Qq, das nach oben wirkt, und auch im Anfange der Zuckung das grössere ist, positiv genommen, so wird die Gleichung der Bewegung:

(7) $$\omega' = \frac{Qq - Mga \sin\varphi}{T} .$$

In dieser Gleichung tritt noch eine Veränderung ein, wenn das System auch das Loth, von welchem oben die Rede war, enthält. Wenn m die Masse des Lothes und r der Halbmesser der oben erwähnten kleinen Rolle ist, so ist mgr das Moment des Lothes in Folge der Schwere in Beziehung zur Drehungsaxe. Das Gewicht mg wird so gestellt, dass das Moment mgr nach unten wirkt und also negativ zu nehmen ist. Wenn T_0 noch das Trägheitsmoment des Lothes in Beziehung zur Drehungsaxe ist, so wird die Gleichung (7):

(8) $$\omega' = \frac{Qq - Mga \sin\varphi - mgr}{T + T_0} .$$

Hier ist die Lage des Systems bestimmt vermittelst des Winkels φ zwischen der oben definirten Ebene in einer Secundärlage und der nach unten durch die Drehungsaxe gehenden Verticale. Für die folgenden Anwendungen ist es jedoch bequemer, die Lage des Systems mittelst des Winkels ψ, den dieselbe Ebene in einer Secundärlage mit deren Anfangslage macht, zu bestimmen; dann ist

$$\varphi = \frac{\pi}{2} + \psi , \quad \text{und also: } \sin\varphi = \cos\psi ;$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{d\psi}{dt} = \omega ; \quad \frac{d^2\varphi}{dt^2} = \frac{d^2\psi}{dt^2} = \frac{d\omega}{dt} = \omega' .$$

Die Gleichung (8) der Bewegung des Systems wird hiermit:

(9) $$\omega' = \frac{Qq - Mga \cos\psi - mgr}{T + T_0} .$$

Diese Gleichung umfasst zwei Anordnungen, die hier zu unterscheiden sind, nämlich: A. der Momentarm q der Muskelkraft hat denselben constanten Werth R in jeder Lage des Systems, und B. dieselbe Grösse q ist mit der Lage veränderlich. Bei der Anordnung A. gestalten sich die Verhältnisse viel einfacher; diese Anordnung ist auch die hier vorzugsweise angewandte und daher genauer zu untersuchen.

A. Der Momentarm der Muskelkraft ist constant.

7) Die Anordnung der Versuche, so dass der Momentarm der Muskelkraft in jeder Lage des Systems einen constanten Werth R hat, wird bekanntlich vermittelst einer Rolle vom Halbmesser R, die mit der Drehungsaxe vereinigt ist, erreicht; der Draht vom Muskel zum System wird hierbei um den Umfang der Rolle in etwas grösserer Länge als die grösste Verkürzung des Muskels geführt und hier befestigt. Die Lage des Muskels und die der Rolle einander gegenüber müssen so geordnet sein, dass der Draht und der Muskel bei Veränderung der Lage des Systems in Folge der Muskelzuckung in derselben Verticale verbleiben.

8) Die Gleichung der Bewegung des Systems. Die Muskelkraft. R statt q in die Gleichung (9) eingeführt, giebt

$$\omega' = \frac{QR - Mga\cos\psi - mgr}{T + T_0}, \tag{10}$$

wovon die Muskelkraft Q unter der Form

$$Q = \frac{Mga\cos\psi + mgr + (T + T_0)\,\omega'}{R} \tag{11}$$

bestimmt wird.

9) Die Verkürzung des Muskels. Während der Verkürzung des Muskels verbleiben bei dieser Anordnung der Muskel und der Draht, der das System mit diesem vereinigt, in derselben Verticale, das System aber wird um den Winkel ψ von der Anfangslage gedreht, und in Folge dessen ein Stück des Drahtes vom Umfange der Rolle los gemacht; dieses Stück hat den Werth $R\psi$, und bestimmt zugleich die Grösse der Verkürzung s des Muskels, weil der Draht und der Muskel in jeder Lage gespannt sind. Hier ist also:

$$s = R\psi; \text{ und daher: } ds = R\,d\psi\ ;\quad \frac{ds}{dt} = R\omega\ ;\quad \frac{d^2 s}{dt^2} = R\omega'. \tag{12}$$

In derselben Weise wie bei der vorigen Anordnung 1 bestimmt hier der Coëfficient ds/dt oder sein Werth $R\omega$ die Geschwindigkeit eines Punktes des Drahtes in verticaler Richtung und zugleich auch die Geschwindigkeit, mit welcher das untere, sehnige Ende des Muskels gegen das obere, befestigte bewegt wird. Ebenso ist $d^2 s/dt^2$ oder $R\omega'$ die Beschleunigung dieser Bewegung.

10) Die vom Muskel dem Systeme mitgetheilte Energie. Wird die Gleichung (11) mit der elementaren Verkürzung ds des Muskels während der unendlich kleinen Zeit dt multiplicirt, so bezeichnet wieder (wie oben in 3) das Glied links $Q\,ds$ die während

derselben Zeit dem Systeme mitgetheilte elementare mechanische Energie dE, weil auch hier ds als die Wegstrecke in der Richtung der Kraft Q während der Zeit dt betrachtet werden kann. Wird noch im rechten Gliede ds nach Gleichung (12) von $R d\psi$ ersetzt, so nimmt die Gleichung folgende Form an:

(13) $$Q\,ds = dE = Mga\cos\psi\,.\,d\psi + mgr\,.\,d\psi + (T + T_0)\,\omega'\,.\,d\psi\,.$$

Eine Integration zwischen den Grenzen ψ gleich Null und gleich ψ giebt hiermit die ganze Energie, die dem Systeme während der Zeit t oder bis zur Lage ψ mitgetheilt ist, nämlich:

(13a) $$\int_0^{\psi} Q\,ds = E = Mga\sin\psi + mgr\psi + \left(T + T_0\right)\frac{\omega^2}{2}\,,$$

weil

$$\omega'\,d\psi = \frac{d\omega\,d\psi}{dt} = \omega\,d\omega = d\left(\frac{\omega^2}{2}\right)\,.$$

Hier bezeichnet $a\sin\psi$ die Höhe, bis zu welcher das Gewicht Mg während der Zeit t gehoben ist, also $Mga\sin\psi$ die geleistete Arbeit; $r\psi$ wieder bezeichnet das Stück des Drahtes, an welchem das Loth hängt, das während derselben Zeit auf die kleine Rolle mit dem Halbmesser r aufgewickelt worden ist und zugleich die Höhe, um welche das Loth gehoben ist, also $mgr\psi$ die hiermit verbundene Arbeit; schliesslich ist

$$\left(T + T_0\right)\frac{\omega^2}{2}$$

die Grösse der Bewegung zu der betreffenden Zeit t. Das rechte Glied bestimmt also die ganze von der Muskelkraft ausgeführten Arbeit, wenn auch hier vorausgesetzt wird, dass keine Hindernisse der Bewegung widerstehen.

11) Specielle Werthe der Muskelkraft und der Energie. In der Anfangslage ist

$$\psi = 0; \quad \text{also auch:} \quad \omega = \omega' = 0\,,$$

also die Muskelkraft Q_1 in dieser Lage:

(14a) $$Q_1 = \frac{Mga + mgr}{R}\,.$$

Während der Contraction nimmt die Muskelkraft erst zu, dann ab — nach dem Schwann'schen Gesetze — bis Null. Zu irgend einer Zeit muss also die Muskelkraft den Anfangswerth Q_1 wieder erhalten; in dieser Lage ist daher:

$$Q = Q_1\,; \quad \text{oder:} \quad \frac{Mga\cos\psi + mgr + (T + T_0)\,\omega'}{R} = \frac{Mga + mgr}{R}\,,$$

d. h.:

(14b) $$Mga(1 - \cos\psi) = (T + T_0)\omega' .$$

In dem Intervalle zwischen den beiden Werthen Q_1 muss Q einen maximalen Werth Q_m annehmen; in dieser Lage ist

(14c) $$Q = Q_m ; \quad \frac{dQ}{dt} = 0 ; \quad - Mga\sin\psi . \omega + \left(T + T_0\right)\frac{d\omega'}{dt} = 0 .$$

Wenn Q gleich Null wird, so ist nach der Gleichung (11):

(14d) $$Q = 0; \quad Mga\cos\psi + mgr + (T + T)\omega' = 0 .$$

Tritt eine Schleuderung des Systems ein, so wirkt der Muskel nicht mehr auf das System, und die Energie E bleibt unverändert, sofern nämlich keine Hindernisse der Bewegung des Systems widerstehen. Vermittelst der Gleichung:

(14e) $$E = Mga\sin\psi + mgr\psi + \left(T + I_0\right)\frac{\omega^2}{2} = \text{Const.}$$

kann also untersucht werden, wann eine Schleuderung des Systems eingetreten ist.

12) Zwei Specialfälle. Diese Anordnung mit constantem Momentarme umfasst noch zwei Specialfälle, die hier näher zu berücksichtigen wären, nämlich: Aa) wenn das Loth mg ganz fortgelassen wird, und Ab) wenn die Belastung des Muskels nur vom Lothe herrührt.

Der Fall Aa), wenn das Loth ganz fortgelassen wird und also m und T_0 gleich Null sind, und die Belastung des Muskels nur vom Momente $Mga \sin\psi$ herrührt, ist in diesem Archiv schon von Dr. A. Clopatt[1] behandelt; hier gehen wir daher auf diese Frage nicht ein.

Im Falle Ab), wenn die Belastung des Muskels nur vom Lothe herrührt, ist

$$a = 0; \quad \text{und:} \quad Mga = 0,$$

und das von den mit der Drehungsaxe fest vereinigten Theilen gebildete System ist in jeder Lage im Gleichgewicht. Nach den Gleichungen (11) und (13a) wird dann

(15a) $$Q = \frac{mgr + (T + T_0)\omega'}{R} \quad \text{und:} \quad E = mgr\psi + \left(T + T_0\right)\frac{\omega^2}{2} .$$

In der Anfangslage ist die Muskelkraft Q_1

(15b) $$Q_1 = \frac{mgr}{R} .$$

[1] A. Clopatt, Zur Kenntniss des Einflusses der Temperatur auf die Muskelzuckung. *Dies Archiv.* 1899. Bd. X. S. 249 bis 334.

Denselben Werth Q_1 erhält die Muskelkraft während der Contraction, wenn ω' gleich Null wird, d. h. wenn die Winkelgeschwindigkeit ω ihren maximalen Werth ω_m annimmt.

Zwischen den beiden letztgenannten Werthen erhält Q den maximalen Werth Q_m, wenn

(15c) $$\frac{d\omega'}{dt} = 0,$$

was hier angiebt, dass Q und ω' zur selben Zeit die maximalen Werthe Q_m und ω'_m erhalten.

Wenn schliesslich Q gleich Null wird, so ist:

(15d) $$Q = 0; \quad mgr + \left(T + T_0\right)\omega' = 0; \quad \text{oder} \quad \omega' = -\frac{mgr}{T + T_0}.$$

Die beiden Anordnungen Aa) und Ab) sind in Beziehung auf die Ausführung der Versuche und der Berechnungen die einfachsten, die hier vorkommen können; doch ist jene nicht so allgemein anzuwenden, wie diese, mit Hinsicht nämlich auf mögliche Schleuderung des Systems.

B. Der Momentarm der Muskelkraft ist veränderlich.

Bei dieser Anordnung der Versuche ist, wie die theoretische Untersuchung zeigt, die Muskelkraft Q abhängig nicht nur von den Constanten des Systems, dem Drehungswinkel ψ und den Coëfficienten ω und ω', sondern auch von der Länge des Muskels in der Anfangslage zusammen mit der Länge des Drahtes, der den Muskel mit dem Systeme vereinigt. Diese Länge ist gewiss nicht leicht genau zu bestimmen; dazu kommt, dass die Berechnungen viel verwickelter als bei der vorigen Anordnung A. werden. Für die theoretische Behandlung der Frage weisen wir daher auf die Originalabhandlung von 1897, S. 24 bis 27 hin, umsomehr, da wir im Folgenden nur die Anordnung A. zu verwenden beabsichtigen.

Die Untersuchung zeigt also, dass bei den Anordnungen 1. und 2.A. des beweglichen Systems gewisse mechanische Verhältnisse des Muskels während der Muskelcontraction in so innigem Zusammenhange mit der Bewegung des Systems stehen, dass, wenn diese für eine bestimmte Zeit bekannt ist, auch jene für dieselbe Zeit berechnet werden können. Um die hier oben in solcher Beziehung aufgestellten Gleichungen (11), (12) und (13a) anzuwenden, sind auch bei der Anordnung 2.A. die veränderlichen Grössen, nämlich ψ, ω und ω', von der Muskelcurve in derselben Weise wie bei der Anordnung 1. herzuleiten; zuerst ist daher

die Lage des Systems, also hier der Drehungswinkel ψ, für gleiche Zeitintervalle zu messen; dann sind die Coëfficienten ω und ω' vermittelst numerischer Interpolation zu berechnen.

Die Bezeichnung „Analyse von Muskelcurven" entspricht also nicht genau den hier vorliegenden Aufgaben, denn die Curvenanalyse lehrt nur die Lage des Systems und ihre Coëfficienten nach der Zeit kennen; wir haben jedoch diese Benennung für die vorliegende Untersuchung gebraucht, weil hier eben die Curvenanalyse — in Beziehung auf die Apparate und die Ausführung der physiologischen Versuche, der Messungen und auch der Berechnungen — das Wesentliche ist. —

II. Der Plan für die Ausführung der Untersuchung.

Vermittelst der Anordnung 2. in der vorigen Abtheilung, also vermittelst eines um eine horizontale Axe drehbaren Systems, sei eine Muskelcurve zu verzeichnen, um analysirt zu werden; als erste Aufgabe gilt es dann zu entscheiden, nach welchen Methoden die Curve zu zeichnen und die Messungen auszuführen sind, um genaue Resultate in Beziehung auf die Werthe für den Drehungswinkel ψ des beweglichen Systems und für die demselben entsprechende Zeit t zu erhalten.

1. Tangentialschrift. Ebene Schreibfläche. Von den beiden Methoden, die zum Verzeichnen der Muskelcurven angewandt sind, — die sog. Front- und Tangentialschrift —, ist der erstgenannten bei genaueren Untersuchungen, z. B. bei Versuchen, Muskelcurven zu analysiren, entschieden der Vorzug gegeben; diese Methode ist aber mit einigen Ungelegenheiten verknüpft, die nicht nöthig sind, hier näher auseinander zu setzen. Weil daher eine Untersuchung in Beziehung auf die Tangentialschrift — von welcher das hier Nöthige unten dargestellt ist — gezeigt hat, dass hiermit genaue Resultate zu erreichen sind, so haben wir nur diese Methode zum Verzeichnen der Curven angewandt. Hier ist sofort hervorzuheben, dass dies — wie schon lange bekannt ist — mit cylindrischer Schreibfläche nicht zu erreichen ist; die Schreibfläche muss eben sein. Dazu muss in dem angewandten Myographion oder in dem beweglichen Systeme desselben der Abstand der Schreibspitze von der Drehungsaxe oder, wie wir kurz im Folgenden sagen, der Schreibarm ϱ in jeder Lage des beweglichen Systems unverändert denselben Werth haben. Oben (in I. 5.) ist vorausgesetzt, dass auch das Trägheitsmoment des beweglichen Systems in Beziehung zur Drehungsaxe in jeder Lage constant ist, weil sonst die Grössen Q

und E nicht berechnet werden können. Nach diesen Principien waren also die hier gebrauchte Schreibfläche und das Myographion nebst dem beweglichen System einzurichten.

2. Die Bestimmung des Drehungswinkels und der Zeit. Weil der Muskel — sowie vorausgesetzt wurde — in verticaler Richtung befestigt ist, muss auch die Schreibfläche vertical gestellt sein; ihre Bewegung sei eine progressive, in horizontaler Richtung mit der constanten Geschwindigkeit c. Das Verhalten der Muskelcurve unter diesen Voraussetzungen zeigt die Fig. 1, wo die Bewegung der Schreibfläche von rechts nach links — wie der Pfeil andeutet — gedacht ist. Die Linie $t_0 p$ bezeichnet die in der Anfangslage des Systems und des Muskels bei Bewegung der Schreibfläche gezeichnete Horizontallinie; auf dieser Linie ist t_0 die Lage der Schreibspitze in dem Augenblicke, wo die Reizung geschieht, und t_1 die Lage derselben, wenn die Zuckung

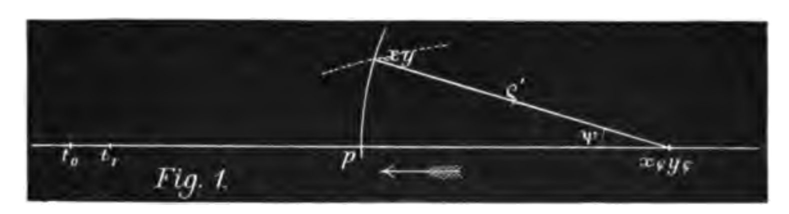


Fig. 1.

anfängt; die punktirte Curve ist ein Stück der Muskelcurve und xy ein Punkt derselben, in welchem die Schreibspitze zur Zeit t, gerechnet z. B. vom Augenblicke t_0 der Reizung, sich befindet. Weil die Schrift tangential ist, so ist die Drehungsaxe des beweglichen Systems senkrecht gegen die Schreibfläche und schneidet (zur Zeit t) diese Fläche in einem Punkte der Linie $t_0 p$, wir nehmen an im Punkte $x_c y_c$. Der (oben definirte) Schreibarm ϱ liegt also in der Schreibfläche, und der Winkel zwischen dem Schreibarme in der Secundärlage ϱ' und der Horizontallinie $t_0 p$ ist der Drehungswinkel ψ des Systems zur Zeit t.

Die Lage des Curvenpunktes xy zur Zeit t im Verhältniss zu der Horizontallinie $t_0 p$ und dem Punkte t_0 auf derselben ist nun bestimmt vermittelst eines Polarcoordinationssystems, welches gewiss von wenig gewöhnlicher Beschaffenheit, aber vollständig genau ist, nämlich von einem Kreisbogen und einer geraden Linie; der Kreisbogen ist der Theil des Kreises mit $x_c y_c$ als Mittelpunkt und ϱ als Halbmesser, der zwischen dem Punkte xy und der Horizontallinie im Puncte p liegt; die gerade Linie ist das Stück $t_0 p$ der Horizontallinie zwischen den Punkten t_0 und p. Von diesen Polarcoordinaten misst der Bogen den Winkel ψ, und ist gleich $\varrho \psi$; die Linie $t_0 p$ wieder misst die Wegstrecke, um welche die Schreibfläche während der Zeit t in horizontaler Richtung

mit der Geschwindigkeit c verschoben ist [oder, was dasselbe ist, um welche der Punkt $x_c\, y_c$ und die Drehungsaxe des Systems während derselben Zeit t vom Punkte t_0 verschoben sind; die Schreibspitze muss also auf dem (soeben definirten) Kreise liegen]; die Linie $t_0 p$ hat also den Werth ct. Der Bogen $\varrho\,\psi$ und die Linie $t_0 p$ oder ct bestimmen daher vollständig die Lage des Curvenpunktes xy zur Zeit t.

Die Messungen für die Bestimmung von ψ und t können hier in folgender Weise bewerkstelligt werden. Die Horizontallinie unter der Muskelcurve wird in eine grössere Anzahl gleich grosser Theile getheilt (das könnte z. B. vermittelst einer Stimmgabel geschehen); jeder Theilstrich giebt also eine bestimmte Zeit (gerechnet z. B. von t_0) an; der einem bestimmten Theilstrich entsprechende Drehungswinkel ψ kann dann an einer Kreisscala unmittelbar abgelesen werden; zu diesem Zwecke ist die Kreisscala mit zwei geraden Schenkeln ϱ_1 und ϱ_2 versehen, die vom Mittelpunkte der Scala ausgehen und dieselbe Länge ϱ wie der Schreibarm haben; der eine Schenkel ϱ_1 ist mit der Scala im Nullpunkte fest vereinigt, der andere Schenkel ϱ_2 wieder kann um den Mittelpunkt der Scala gedreht und sein Winkel mit ϱ_1 in jeder Lage an der Scala abgelesen werden. Um mit diesem Apparate den Winkel ψ zu messen, wird der mit der Scala unbeweglich vereinigte Schenkel ϱ_1 längs der Horizontallinie $t_0 p$, mit seinem freien Ende (links in der Figur) auf den bestimmten Theilstrich gestellt, sodann wird der bewegliche Schenkel ϱ_2 gedreht, bis das freie Ende desselben auf der Muskelcurve liegt; in dieser Lage hat der Schenkel ϱ_2 dieselbe Lage in Beziehung zur Muskelcurve, wie der Schreibarm zur Zeit t hatte, und der Winkel ψ, der dem betreffenden Theilstrich entspricht, ist an der Scala abzulesen. Das Princip für diese Messung des Winkels ψ ist also folgendes: dem beweglichen Schenkel ϱ_2 wird für jeden Curvenpunkt (ψ, t), für welchen die Messung auszuführen ist, dieselbe Lage zur Muskelcurve gegeben, wie der Schreibarm ϱ zur Zeit t, beim Verzeichnen desselben Curvenpunktes, hatte. Dies ist auch das Princip, nach welchem die Messungen im Folgenden ausgeführt sind.

Theoretisch betrachtet scheint dies Verfahren, die Messungen auszuführen, sehr einfach zu sein, und Apparate sind auch construirt, um eine ebene Schreibfläche mit constanter Geschwindigkeit zu verschieben. Um jedoch die hier nöthige Genauigkeit der Bewegung der Schreibfläche und der Abmessungen mit grösserer Sicherheit zu erzielen, haben wir die verschobene Schreibfläche durch eine mit constanter Winkelgeschwindigkeit (um eine gegen die Fläche senkrechte Axe) rotirende ersetzt. Dass die Grössen ψ und t auch unter solchen Verhältnissen in

derselben Weise, wie bei der soeben behandelten Anordnung, bestimmt werden können, zeigt die folgende Betrachtung.

In der untenstehenden Fig. 2 ist O der Mittelpunkt der kreisförmigen (in der Ebene des Papiers gedachten) Schreibfläche oder, genauer ausgedrückt, der Punkt, wo die gegen die Fläche senkrechte Drehungsaxe dieselbe trifft; der äussere Kreisbogen begrenzt einen Theil des Umfanges der Schreibfläche. Die Drehung der Fläche sei der der Uhrzeiger entgegengesetzt (wie der Pfeil andeutet). Beim Verzeichnen einer Curve ist der Schreibfläche eine verticale Lage zu geben und das Myographion so zu stellen, dass der (oben definirte) Schreibarm ϱ in der Ebene der Schreibfläche liegt; in der Anfangslage des beweg-

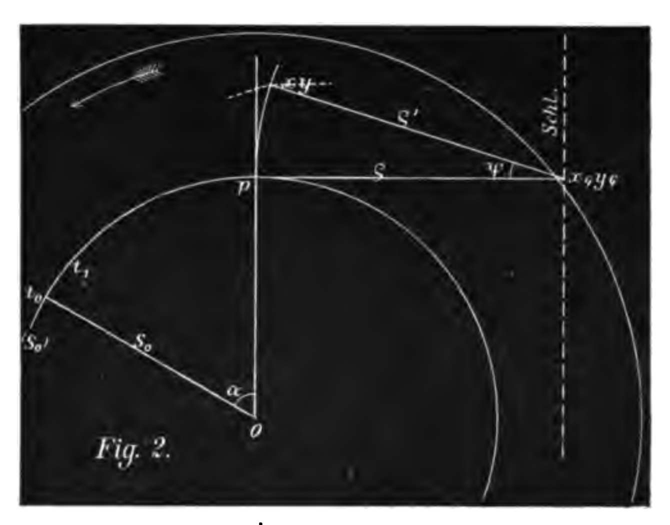


Fig. 2.

lichen Systems ist weiter die Schreibspitze auf einen Punkt des oberen verticalen Halbmessers der Schreibfläche zu stellen; in der Figur bezeichnet ϱ die Anfangslage des Schreibarmes. Das andere Ende des Schreibarmes liegt im Punkte $x_c\ y_c$, wo die Drehungsaxe des Armes senkrecht gegen die Schreibfläche steht.

Wird bei dieser Lage des Schreibarmes die Schreibfläche gedreht, so zeichnet die Schreibspitze einen Kreis mit dem Punkte O als Mittelpunkt; in jedem Punkte des Kreises, dessen Halbmesser S_0 ist, ist der Schreibarm eine Tangente desselben. Dieser Kreis — den wir im Folgenden den Anfangskreis der Muskelcurve nennen und kurz Kreis (S_0) bezeichnen — entspricht hier der Horizontallinie $t_0\,p$ bei der vorigen Anordnung; auf demselben bezeichnen wieder t_0 und t_1 die Augenblicke der Reizung und des Anfanges der Muskelzuckung, wenn die Muskelcurve auf rotirender Scheibe gezeichnet wird; die punktirte Curve durch

den Punkt xy bezeichnet ein Stück der Muskelcurve. Die Lage dieses Punktes xy zur Zeit t im Verhältniss zum Anfangskreise (S_0) und dem Punkte t_0 ist wieder zu bestimmen.

Die Zeit t wird gerechnet von dem Augenblicke t_0 an, wo die Reizung geschah; in diesem Augenblicke hatte die Schreibscheibe eine solche Lage, dass der Punkt t_0 des Anfangskreises unter oder hinter der Schreibspitze gelegen war; die Zeit t, die seitdem verflossen ist, wird gemessen von dem Winkel α, den der Halbmesser S_0 des Anfangskreises nach dem Punkte t_0 während dieser Zeit t überfahren hat. Auf dem Kreise mit dem Punkte $x_c\, y_c$ als Mittelpunkt und dem Schreibarme ϱ als Halbmesser befindet sich also zur Zeit t die Schreibspitze. Der Schnittpunkt xy dieses Kreises mit der Muskelcurve bestimmt dann die Secundärlage ϱ' des Schreibarmes zur Zeit t, und der Winkel zwischen ϱ und ϱ' ist der Drehungswinkel ψ. Die Lage des Punktes xy der Muskelcurve zur Zeit t wird also bei dieser Anordnung vermittelst zwei Kreisbogen, nämlich $S_0\,\alpha$, der die Zeit t, und $\varrho\,\psi$, der den Drehungswinkel ψ misst, bestimmt. Nach dem, was soeben gesagt wurde, ist hier der Winkel α proportional mit der Zeit t und also gleich $o\,t$, wo die Proportionalitätsconstante o die Winkelgeschwindigkeit der Schreibfläche bezeichnet; weiter ist derselbe Winkel α eine geometrisch bestimmte Grösse, die an der Muskelcurve gemessen werden kann. Im Folgenden wird daher der Winkel α gemessen und davon die entsprechende Zeit t berechnet.

Dass die Messungen der Winkel α und ψ auch bei dieser Anordnung mit dem oben gedachten Winkelmesser ausgeführt werden können, geht — von der nächst vorangehenden Darstellung — unmittelbar hervor; dem mit der Scala unbeweglich vereinigten Schenkel ϱ_1 ist nur die Lage von ϱ in Fig. 2, also die Lage einer Tangente des Anfangskreises unter der Muskelcurve zu geben; dann ist der andere Schenkel ϱ_2 zu drehen, bis das freie Ende desselben auf der Muskelcurve liegt, um den Drehungswinkel ψ an der Scala ablesen zu können. Um die erstgenannte Aufgabe zu erfüllen, sei in der Fig. 2 die punktirte gerade Linie *Schl* ein Schlitten — als eine gerade Linie gedacht —, der in dem Abstande ϱ (also gleich der Länge des Schreibarmes) vom Mittelpunkte O des Anfangskreises (S_0) liegt; dann ist der Schenkel ϱ_1 des Winkelmessers längs dem Schlitten und senkrecht gegen denselben in der Ebene der Schreibfläche zu verschieben, bis dessen freies Ende (links in der Figur) an der Umfangslinie des Anfangskreises liegt und also eine Tangente desselben ist. — Was die Messung des Winkels α betrifft, so kann dieselbe, wie bei der vorigen Anordnung erwähnt wurde, durch Theilung des Anfangskreises geschehen; bequemer

ist jedoch am Umfange der Schreibfläche, mit dem Punkte O als Mittelpunkt, eine Kreisscala mit dazu gehörigem Nonius anzubringen; dann kann für einen beliebigen Winkel α der entsprechende Winkel ψ mit dem betreffenden Winkelmesser abgelesen werden.

3. Der Plan für die Ausführung der Versuche und der Messungen ist somit folgender geworden:

a) Die Schreibfläche (eine ebene, kreisförmige Glasscheibe) wird in verticaler Richtung aufgestellt, und kann im gewünschten Augenblicke in Rotation mit constanter Winkelgeschwindigkeit um eine horizontale Axe versetzt werden; während der Drehung derselben wird ein Contact eines elektrischen Stromes geöffnet, um den Muskel zu reizen. Das Myographion, mit dem beweglichen Systeme (nach den oben angegebenen Principien eingerichtet) in die Anfangslage gestellt, wird der Schreibfläche genähert und verschoben, bis der (oben definirte) Schreibarm ϱ in der Schreibfläche liegt und die Schreibspitze (eine Stahlnadel) den oberen verticalen Halbmesser der Scheibe in einem Punkte berührt. Nach dieser Anordnung wird die Schreibfläche in Rotation versetzt und die Muskelcurve gezeichnet. Sodann wird noch der Augenblick t_0 der Reizung in gewöhnlicher Weise auf der Scheibe angedeutet.

b) Das Myographion wird entfernt, und die Schreibfläche in die ursprüngliche Lage, mit demselben Halbmesser nach oben in der Verticale, gestellt. Vermittelst eines Pfeil'schen Signalapparates, dessen Schreibspitze die Schreibfläche in einem Punkte des genannten Halbmessers berührt, wird dann eine Zeitcurve gezeichnet. Schliesslich folgen

c) Die Messungen von den Winkeln ψ und α vermittelst zwei Kreisscalen, die in einem hierfür eingerichten Apparate vereinigt sind. Zu diesem Zwecke wird die Glasscheibe auf dem Apparate in horizontaler Lage befestigt, kann aber hier nebst der Unterlage um dieselbe Axe, um welche sie beim Verzeichnen der Muskelcurve rotirte, gedreht und in jeder Lage befestigt werden; weiter kann die Grösse des Drehungswinkels vermittelst einer Kreisscala mit Nonius am Umfange der Glasscheibe gemessen werden; an dieser Scala wird — wie schon angedeutet ist — der Winkel α gemessen. In Uebereinstimmung mit den geometrischen Eigenschaften der betreffenden Muskelcurve, von welchen oben die Rede war, werden die Messungen vermittelst eines Messarmes ϱ_2, von der Länge ϱ des Schreibarmes, bewerkstelligt. Dieser Arm ϱ_2 ist mit dem rechts in Figg. 2 oder 3 gelegenen Ende an einem Schlitten (*Schl.* in der Figur) vereinigt, aber so, dass derselbe in der Ebene der Schreibfläche sowohl verschoben als gedreht werden kann.

[Hier mag bemerkt werden, dass in der Wirklichkeit der Schlitten und den Messarm nicht in der Ebene der Schreibfläche liegen können, sondern dass sie in damit parallelen Ebenen gelegen sind; der Schlitten *Schl.* und der Messarm ϱ_2 in der Figur können aber als die Projectionen des wirklichen Schlittens bezw. des Armes — beide als gerade Linien gedacht — auf der Ebene der Schreibfläche betrachtet werden.] Diese beiden Bewegungen können auf Scalen gemessen werden; die Scala für die Messung der Drehung dient — wie unten bald ersichtlich sein wird — zur Bestimmung der Grösse des Drehungswinkels ψ, und die Scala für die Messung der Verschiebung zur Be-

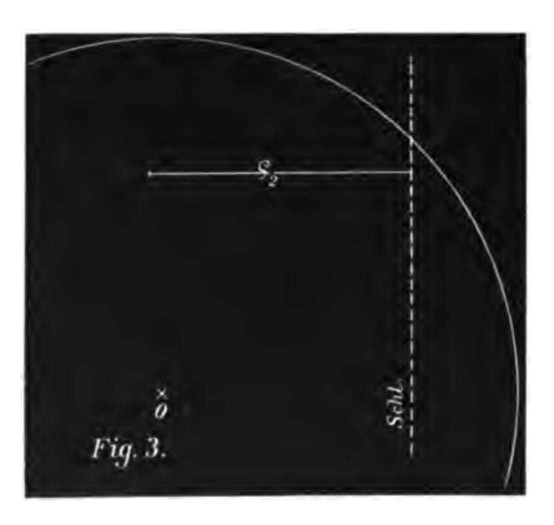


Fig. 3.

stimmung der Länge des Halbmessers S_0 des Anfangskreises der Muskelcurve.

Um mit Hülfe dieser Vorrichtung die Messungen bewerkstelligen zu können, ist der Arm ϱ_2 zuerst in die Anfangslage des Schreibarms ϱ zu bringen; zu diesem Zwecke wird dieser Arm senkrecht gegen den Schlitten befestigt, so dass keine Drehung stattfinden kann, und in dieser Lage längs dem Schlitten verschoben, bis das freie Ende desselben (links in Fig. 3) auf dem Anfangskreise der Muskelcurve liegt, und bis also der Arm ϱ_2 eine Tangente dieses Kreises und in der Anfangslage des Schreibarmes ϱ ist. Nun wird die Schreibfläche gedreht, bis der Punkt t_0 am freien Ende des Armes ϱ_2 liegt; in dieser Lage — die Anfangslage des Schreibarmes ϱ zur Zeit t_0 — ist der Arm zu befestigen, so dass auch keine Verschiebung desselben mehr stattfinden kann, und die Lage des Punktes t_0, von welchem aus der Winkel α zu rechnen ist, wird auf der Kreisscala am Umfange der Schreibscheibe

bestimmt; in dieser Lage kann auch die Länge des Halbmessers S_0 des Anfangskreises an einer Scala, die am Schlitten befestigt ist, abgelesen werden. — Wird nun die Schreibfläche gedreht, so dass der Punkt t_1 des Anfangskreises, wo die Muskelcurve anfängt, also sich vom Anfangskreise erhebt, am freien Ende des Armes befindet, so kann der Winkel α_0, von welchem das latente Reizungsstadium t_{10} zu berechnen ist, abgelesen werden. — Um schliesslich den Drehungswinkel ψ für einen beliebigen Winkel α unter der Muskelcurve zu messen, wird die Schreibfläche gedreht, so dass der Winkel α an der Kreisscala am Umfange der Schreibscheibe abgelesen werden kann; dann ist das Hinderniss der Drehung des Messarmes ϱ_2 (vermittelst einer Schraube) aufzuheben, das freie Ende des Armes auf der Muskelcurve einzustellen, und nachdem der Arm wieder befestigt worden ist, geschieht die Ablesung des Drehungswinkels ψ auf einer an der Drehungsaxe des Armes befestigten Kreisscala.

Hier sei noch bemerkt, dass für genaue Einstellung auf einem Curvenpunkte das freie Ende des Armes mit einem Mikroskop, in dessen Oculare ein Haarkreuz sich befindet, zu versehen ist; der betreffende Curvenpunkt ist dann im Kreuzungspunkte einzustellen, wenn nämlich der Abstand des letztgenannten Punktes von der Drehungsaxe des Armes gleich der Länge ϱ des Schreibarmes gemacht ist. — Um den Drehungswinkel ψ, für den die Einstellung sehr genau geschehen kann, auch genau ablesen zu können, sind kleine Winkel — kleiner z. B. als 5 Winkelminuten — auf einem Ocularmikrometer abzulesen.

Durch Drehung des Haarkreuzes im Ocular des Mikroskopes kann auch der Winkel Θ zwischen dem Schreibarm in einer Secundärlage und dem nächsten Element der Muskelcurve abgelesen werden; die Einstellung für die Ablesung dieses Winkels kann jedoch nicht so genau geschehen, wie für die Ablesung der oben genannten Grössen α, ψ und S_0.

Zusatz. Um noch zu berücksichtigen, wie die Untersuchung bei der Anordnung I. 1. — d. h. wenn jeder Punkt des Systems während der Muskelzuckung längs einer Verticale verschoben wird — bewerkstelligt werden kann, sei hier bemerkt, dass diese Anordnung als ein specieller Fall eines drehbaren Systems — also der Anordnung I. 2. — betrachtet werden kann; wird nämlich in der Anfangslage eines drehbaren Systems der Drehungspunkt $x_c\,y_c$ (in Figg. 1 oder 2) längs dem Schreibarme in immer grösserem Abstande von der Schreibspitze verschoben gedacht, so tritt die Anordnung I. 1. ein, als dieser Punkt in unendlichem Abstande sich befindet. In dieser Lage ist der oben definirte Schreibarm ϱ eine unendlich lange Linie, die während der Muskelzuckung sich selbst parallel verschoben wird.

Wird daher die Muskelcurve auf eine verschobene Schreibfläche — so wie in Fig. 1 angenommen ist — gezeichnet, so wird der Kreis (mit dem Halbmesser ϱ), der den Curvenpunkt xy und die entsprechende Zeit t bestimmt, eine gerade verticale Linie; von den (in der Figur angenommenen) Coordinaten ist dann die Ordinate y gleich der Verkürzung s, und die Abscisse x hat den Werth ct. Die rechtwinkligen Coordinaten yx sind also für gleiche Zeitintervalle oder gleiche Zuwächse der Abscisse x zu messen, um die Coëfficienten ds/dt und d^2s/dt^2 zu berechnen. Apparate für solche Coordinatenmessungen sind schon lange bekannt.

Ist die Curve wieder auf eine Schreibfläche, die um eine horizontale Axe gedreht wird — so wie in Fig. 2 angenommen ist — gezeichnet, so befindet sich die Schreibspitze zur Zeit t auf dem Durchmesser der Schreibfläche, der zur selben Zeit eine verticale Lage hat. Die Verkürzung s des Muskels zur Zeit t ist dann gleich dem Abstande des Punktes xy vom Anfangskreise (S_0) oder gleich ($S-S_0$), wenn S den Radius Vector vom Mittelpunkte O der Schreibfläche nach dem Curvenpunkte xy bezeichnet, und die entsprechende Zeit t wird bestimmt vom Winkel α zwischen dem Radius Vector S und dem Halbmesser S_0 des Anfangskreises vom Mittelpunkte O nach t_0; dieser Winkel α hat den Werth ot. Bei dieser Anordnung der Versuche ist also der Radius Vector S für gleiche Intervalle des Winkels α zu messen, um die Coëfficienten ds/dt und d^2s/dt^2 zu ermitteln. Solche Messungen könnten vermittelst der oben gedachten Einrichtung zur Messung des Winkels ψ bewerkstelligt werden, wenn nämlich der Arm ϱ_2 (in Fig. 3) senkrecht gegen den Schlitten befestigt wird, so dass derselbe nur verschoben werden kann.

Beiträge zur Kenntniss der Ermüdung beim Menschen.[1]

Von

Dr. S. Stupin
aus Moskau.

(Aus dem physiologischen Laboratorium des Carolinischen medico-chirurgischen Instituts in Stockholm.)

(Hierzu Taf. IV.)

I.

Die Physiologie der Ermüdungserscheinungen beim Menschen hat durch die Erfindung des Ergographen von Mosso einen ausserordentlich wichtigen Fortchritt gemacht, und unter Anwendung dieses Apparates sind zahlreiche Untersuchungen ausgeführt worden, welche in vielerlei Hinsicht unsere Kenntnisse von der Muskelarbeit beim Menschen erweitert und vertieft haben. Indess finden sich hier, wie überall in der Wissenschaft, noch viele Fragen, welche auf eine nähere Erörterung warten, so z. B. wie sich die Ermüdungserscheinungen bei Arbeit mit grossen Muskelmassen gestalten. Von vornherein ist es ja äusserst wahrscheinlich, dass sich die von Mosso und seinen Nachfolgern ermittelten Gesetze nicht allein auf die Arbeit mit den Beugern des Mittelfingers bezw. dem Biceps (Treves) beziehen, sondern dass sie ür die Muskeln überhaupt gültig sind. Dennoch scheint eine ergographische Untersuchung grösserer Muskelmassen nicht ganz überflüssig zu sein, theils um die an kleinen Muskelgruppen gewonnenen Resultate zu bestätigen, theils um die möglicher Weise vorhandenen Differenzen nachzuweisen.

Ich folgte daher gern dem Vorschlage des Herrn Prof. Tigerstedt, eine Untersuchung in dieser Richtung auszuführen. Leider gestattete die allzu kurze Zeit, die ich in Stockholm verweilen durfte,

[1] Der Redaction am 1. Mai 1901 zugegangen.

es nicht, die Untersuchung auf ein grösseres Gebiet auszudehnen. Ich glaube indess, dass auch die bis jetzt erzielten Resultate ein gewisses Interesse beanspruchen dürften, weshalb ich dieselben hier kurz mittheilen werde.

Zur Ausführung der betreffenden Untersuchung stand mir ein von Herrn Professor J. E. Johansson gebauter Arbeitsapparat zur Verfügung. Da derselbe in diesem Archiv (Bd. XI. S. 273) schon beschrieben ist, kann ich mich hier darauf beschränken, den allgemeinen Gang der Versuche zu beschreiben.

Unter Anwendung der beiden oberen Gliedmaassen wird bei jeder Contraction eine Arbeit derselben Grösse ausgeführt, indem das belastende Gewicht in regelmässigen Intervallen (jede 3. Secunde) um eine und dieselbe Hubhöhe gehoben und gesenkt wurde (automatische Hebung und Senkung der Belastung kam nicht vor; vgl. die Abhandlung von Prof. Johansson). Die Arbeit wurde ununterbrochen fortgesetzt, bis es der Versuchsperson nicht mehr möglich war, das Gewicht um die bestimmte Höhe zu heben. Dieser Augenblick wurde als Zeichen der eingetretenen Ermüdung aufgefasst.

Darauf wurde abgewartet, bis sich die Muskeln wieder in einem genügenden Grade erholt hatten — nach einigen darauf gerichteten, indess nicht besonders zahlreichen Versuchen wurde diese Zeit auf 40′ bemessen — und dann eine zweite, bezw. dritte Ermüdungsreihe durchgeführt. Die Versuche fanden Vormittags etwa zu derselben Stunde statt.

Es stellte sich bald heraus, dass, trotz der beabsichtigten gleichen Hubhöhe bei allen Contractionen, dennoch eine graphische Aufzeichnung derselben vortheilhaft war, weshalb der Apparat mit einem Schreibhebel versehen wurde, welcher die Contractionen in verkleinertem Maassstabe registrirte.

Bei den meisten Versuchen diente ich selber als Versuchsperson. Um jedoch zu prüfen, ob die an mir gewonnenen Resultate etwa als allgemeingültig aufzufassen waren, habe ich einige Versuche auch an zwei anderen Individuen ausgeführt, nämlich an Herrn Dr. V. O. Sivén aus Helsingfors, welchem ich für seine Gefälligkeit grossen Dank schulde, und an einem 17jährigen Manne, der zur Zeit als Heizer am Carolinischen Institut angestellt war.

Bevor ich zur Darstellung meiner Ergebnisse übergehe, muss ich die Frage erörtern, ob das von mir benutzte Kriterium der Ermüdung — die Unfähigkeit, das Gewicht zu der bestimmten Höhe aufzuheben — wirklich dem gestellten Zweck entspricht. Eine vollständige Erschöpfung war zu dieser Zeit natürlich nicht erreicht, und es handelt sich also

nur darum, ob die Ermüdung am Ende jeder Reihe überhaupt so weit fortgeschritten war, dass die Versuchsperson es nicht mehr vermochte, die gleiche Arbeit noch weiter fortzusetzen.

Das subjective Gefühl der Ermüdung kann natürlich in dieser Hinsicht nicht als maassgebend erachtet werden, sondern es gilt, wenn möglich, objective Merkmale finden zu können. Gerade zu diesem Zwecke habe ich die Contractionen graphisch registrirt, was sonst für die Bestimmung der geleisteten Arbeit gar nicht nöthig gewesen wäre.

Diese Arbeitscurve hat im Beginn ein ganz gleichförmiges Aussehen. Die Hebungen und Senkungen werden vollkommen egal ausgeführt, die Dauer der Contraction und der Pause ist überall die gleiche. Während dieses Abschnittes der Ermüdungsreihe arbeitet die Versuchsperson also ganz gleichmässig, und zwar subjectiv ohne jede Anstrengung.

Mit dem Fortschreiten der Arbeit erscheinen aber von Zeit zu Zeit nach dem Herablassen des Gewichtes am Fusspunkte der Curve kleine Zacken, welche dadurch bedingt sind, dass das Gewicht nicht, wie bei den früheren Contractionen, beim Heruntergehen vollständig von den Muskeln getragen wird, sondern unter dem Einflusse der Schwere eine gewisse Beschleunigung annimmt.

Dieser „Doppelschlag“ erscheint im weiteren Verlaufe der Reihe immer öfter; auch die Contractionscurven verändern sich nicht unbeträchtlich. Die Dauer der Contraction nimmt ab und die Pausen zwischen den einzelnen Contractionen werden immer länger, um den ermüdenden Muskeln eine längere Ruhe zu gestatten. Der frühere Rhythmus wird aber noch eingehalten, nur einzelne Contractionen kommen etwas zu früh oder etwas zu spät. Die Versuchsperson hat zu dieser Zeit ein ausgeprägtes Gefühl von Ermüdung und bekämpft dasselbe absichtlich. Dieses Gefühl nimmt immer mehr zu, und zwar stellt es sich bei einer und derselben Arbeitsleistung ziemlich um dieselbe Zeit, vom Beginn des Versuches an gerechnet, ein; bei fortschreitender Uebung wird die Dauer bis zum subjectiven Eintritt dieses Gefühls immer länger.

Die Arbeit während dieses Abschnittes wäre also etwa als erschwerte Arbeit zu bezeichnen.

Nach und nach werden nun die Contractionen immer mehr unregelmässig: die Dauer der Contractionen, sowie die der Pausen verlängern sich alle beide, und nach einigen Contractionen ist es der Versuchsperson nicht mehr möglich, die volle Contraction auszuführen (vgl. Taf. IV Fig. 1; in derselben stellt die Abth. *A* den Beginn, die

Abth. *B* das Ende eines Versuches dar; von rechts nach links zu lesen). Die Arbeit während dieses Abschnittes bezeichne ich als **angestrengte** Arbeit.

Es ist natürlich, dass diese drei Abschnitte der subjectiv leichten, der erschwerten und der angestrengten Arbeit nicht ganz scharf von einander getrennt werden können; sowohl subjectiv als objectiv, aus der Contractionscurve, lassen sie sich jedoch im grossen Ganzen gut unterscheiden. Indess kann es der Fall sein, dass in einer gegebenen Ermüdungsreihe der erste oder der dritte Abschnitt fehlt; in jenem Falle war die zugemuthete Arbeitsleistung von Anfang an für die Versuchsperson zu gross; in diesem hatte die Versuchsperson die Arbeit nicht lange genug fortgesetzt.

Wie es mir scheint, geht aus diesem Verhalten des objectiven Verlaufes der Ermüdungsreihe hervor, dass am Ende einer solchen, wo der dritte Abschnitt deutlich ausgeprägt ist, in der That die Ermüdung so weit fortgeschritten gewesen, wie es dem Versuchszwecke entspricht.

Noch nach einer anderen Methode habe ich es versucht, den Gang der Ermüdung bei meinen Versuchen zu verfolgen. Zu diesem Zwecke ging ich von folgender Ueberlegung aus.

Beim Heben des Gewichtes braucht der den betreffenden Muskeln abgegebene Willensimpuls nicht nothwendig immer vollkommen gleich gross zu sein. Es kann der Fall sein, dass dieser Impuls bei einer Contraction grösser oder geringer ist, als bei einer anderen, obgleich die geleistete mechanische Arbeit wegen des Anschlages des Handgriffes immer die gleiche ist. Es war also wünschenswerth, die Stärke jeder einzelnen Contraction zu bestimmen. Ich habe versucht, dieses dadurch zu erreichen, dass ich an der Stelle, gegen welche der Handgriff anschlug, einen Gummischlauch anbrachte. Dieser war an dem einen Ende geschlossen und stand mittels einer an dem anderen Ende angebrachten Gummiröhre mit einer Marey'schen Schreibkapsel in Verbindung. Je nachdem der Handgriff am Ende der Contraction stärker oder schwächer gegen den Schlauch gepresst wurde, wurden die von der Schreibkapsel geschriebenen Linien höher oder niedriger und stellten also einen relativen Ausdruck der am Ende der Contraction noch vorhandenen Energie dar.

Um ferner die am Ende der Senkung des Gewichtes stattfindende Geschwindigkeit auszudrücken, placirte ich einen Kardiographen mit Luftübertragung so, dass er vom Handgriff in dem Moment beeinflusst wurde, als das Gewicht gegen die Bodenplatte des Apparates anschlug. War diese Geschwindigkeit eine geringe, so war auch der Ausschlag

des Kardiographen klein; je grösser diese Geschwindigkeit war, um so grösser waren auch die Ausschläge.

Es ist ohne weitere Darlegungen klar, dass die Ausschläge des Gummischlauches immer kleiner werden sollten, je weiter die Ermüdung fortschritt und je geringer dementsprechend die am Ende des Hubes noch vorhandene Energie war. Auf der anderen Seite mussten ja die Ausschläge des Kardiographen im Verlaufe der Versuchsreihe immer grösser werden, wenn in Folge der eintretenden Ermüdung das Gewicht mit immer zunehmender Geschwindigkeit herabgelassen wurde. Diese Voraussetzungen wurden durch die Versuche vollauf bestätigt, wie aus Taf. IV Fig. 2 ersichtlich ist. Die dort abgebildete Curve bezieht sich auf mich selber; die Belastung betrug 25 ^{kg} und wurde auf 40 ^{cm} Höhe gehoben. Die Curve *A* ist die vom Schlauche, die Curve *B* die vom Cardiographen erhaltene Curve. Die Curven sind von rechts nach links zu lesen. Aus denselben ist ersichtlich, wie im Laufe des Versuches und ganz besonders am Ende desselben die Ausschläge in der Curve *A* immer kleiner, dagegen die in der Curve *B* immer höher werden — was, wie schon bemerkt, den von mir gemachten Voraussetzungen völlig entspricht.

Ausserdem finden wir noch etwas Anderes. Wenn wir die Spitzen der Curve *A* mit einander verbinden, so erhalten wir keine Gerade, sondern eine Linie von wellenartigem Verlauf. Dies zeigt, dass die Stärke der Contractionen im Verlaufe des Versuches nicht regelmässig abnahm, sondern dass sie trotz der gleichen mechanischen Arbeit deutliche periodische Schwankungen zeigte.

Diese Schwankungen haben mit den von Lombard[1] und Maggiora[2] mit dem Ergographen geschriebenen, sowie mit den von Treves[3] am Kaninchen gewonnenen Ermüdungscurven eine unverkennbare Aehnlichkeit. Die beiden erstgenannten Autoren fassen die Periodicität der Ergographencurven als eine Ermüdungserscheinung auf, und zwar würde sie von Schwankungen der centralen Reize bedingt sein. Treves schreibt die in seinen Curven erscheinende Periodicität der Elasticität des Muskels zu (er bekam diese Curven, indem er die Belastung des elektrisch gereizten Gastrocnemius verkleinerte, nachdem der Muskel für eine stärkere Belastung ermüdet war).

Meines Erachtens sind die von mir bei der Curve *A* beobachteten Wellen in der von Lombard und Maggiora vertretenen Weise zu

[1] Lombard, *Arch. ital. de biologie.* Bd. XIII. S. 371.
[2] Maggiora, ibid. Bd. XXIX. S. 267.
[3] Treves, ibid. Bd. XXIX. S. 167. Fig. 17 bis 20.

deuten. Dafür spricht ganz besonders die Thatsache, dass auch die in der Curve *B* registrirten Veränderungen einen ähnlichen wellenförmigen Verlauf darbieten; die hier auftretenden Wellen fallen aber nicht immer mit denen der Curve *A* zusammen. Sie können daher nicht von einer und derselben Ursache, etwa Elasticitätsveränderungen, wie es sich Treves vorstellt, bedingt sein, sondern müssen aller Wahrscheinlichkeit nach von der verschiedenen Intensität des Willensimpulses hervorgerufen werden.

Eine nähere Erörterung des Ursprunges und der Bedeutung dieser Wellen muss ich indess hier unterlassen, da mein Versuchsmaterial zu dürftig ist, um eine solche durchzuführen. Aus demselben Grunde muss ich auch die im Verlauf dieser Wellen erscheinenden Einzelheiten unberücksichtigt lassen.

Bei einigen Versuchen habe ich ausserdem auch die Athembewegungen unter Anwendung des Marey'schen Pneumographen registrirt. Leider war die zu meiner Verfügung stehende Zeit zu kurz, um diesen Theil meiner Untersuchung einigermaassen befriedigend durchzuführen. Ich muss daher darauf verzichten, die bei der Muskelarbeit auftretenden Veränderungen der Athembewegungen hier zu besprechen, bemerke aber, dass eine genauere Untersuchung derselben für die nähere Erörterung der Ermüdungserscheinungen von einer gegewissen Bedeutung wäre, denn die Art und Weise, in welcher die Athembewegungen im Verlaufe einer forcirten Muskelarbeit sich verändern, würde aller Wahrscheinlichkeit nach mit dem Verlauf der Ermüdung in einen nahen Zusammenhang gebracht werden können.

Ich werde jetzt die bei meinen Ermüdungsreihen gewonnenen Ergebnisse kurz zusammenstellen.

Die bei jeder Contraction ausgeführte Muskelarbeit kann bei dem von mir benutzten Apparat sowohl durch Veränderung der Belastung, als durch Veränderung der Hubhöhe variirt werden, und man kann daher ohne Schwierigkeit experimentell prüfen, wie sich die Muskeln verhalten, wenn bei gleichbleibender mechanischer Arbeit die Belastung und Hubhöhe in zweckentsprechender Weise verändert werden.

Die Tabellen I und II stellen einige Versuche zusammen, bei welchen die gleiche mechanische Arbeit, aber bei verschiedenem Gewicht und entsprechend verschiedener Hubhöhe ausgeführt wurde. In jeder Tabelle ist der Tag des Versuches, die Belastung (in Kilogrammen) und Hubhöhe (in Metern), die Zahl der Contractionen in jeder mit einem Intervall von 40 Minuten ausgeführten Ermüdungsreihe aufgenommen; ferner Berechnungen über die mittlere Zahl der Con-

tractionen in jeder Ermüdungsreihe und über die Grösse der in allen drei Reihen zusammen ausgeführten mechanischen Arbeit.

Tabelle I. Versuchsperson S. S. (1899.)

a) Arbeit pro Contraction 5 kg-m.

	Datum			
	27. Oct.	26. Oct.	31. Oct.	16. Nov.
Belastung und Hubhöhe	10 × 0·5	20 × 0·25	25 × 0·2	25 × 0·2
Zahl der Contrationen. I. Reihe	302	115	79	129
„ „ „ II. „	402	130	80	150
„ „ „ III. „	284	173	74	103
Mittlere Zahl der Contractionen[1]. .	329	139	78	127
Grösse der mechanischen Arbeit. .	4940	2090	1165	1910

b) Arbeit pro Contraction 6 kg-m.

	Datum						
	3. Nov.	2. Nov.	1. Nov.	24. Nov.	20. Nov.	21. Nov.	23. Nov.
Belastung und Hubhöhe . . .	12×0·5	20×0·3	30×0·2	12×0·5	15×0·4	20×0·3	30×0·2
Zahl der Contractionen. I. R.	343	113	41	372	287	216	48
„ „ „ II. „	[56][2]	121	37	339	322	122	61
„ „ „ III. „	[102][3]	107	40	303	339	125	40
Mittlere Zahl der Contraction.	343[4]	114	39	338	316	154	50
Grösse der mechan. Arbeit	2894	2046	708	6084	5688	2778	894

c) Arbeit pro Contraction 7·5 kg-m.

	Datum			
	29. Oct.	25. Nov.	7. Nov.	17. Nov.
Belastung und Hubhöhe	15 × 0·5	15 × 0·5	25 × 0·3	25 × 0·3
Zahl der Contractionen. I. Reihe	83	311	98	60
„ „ „ II. „	94	107	41	54
„ „ „ III. „	161	184	55	44
Mittlere Zahl der Contractionen . . .	113	201	65	53
Grösse der mechanischen Arbeit. . .	2551	4515	1455	1135

[1] Alle Durchschnittszahlen sind auf Einheiten abgerundet.
[2] 30 kg Belastung, 0·2 m Hubhöhe.
[3] 20 kg Belastung, 0·3 m Hubhöhe.
[4] Nur die Bestimmung der Reihe I.

Tabelle I. (Fortsetzung.)

d) Arbeit pro Contraction 10 kg-m.

	Datum		
	30. Octbr.	14. Nov.	18. Nov.
Belastung und Hubhöhe	20 × 0·5	20 × 0·5	25 × 0·4
Zahl der Contractionen. I. Reihe	57	40	40
„ „ „ II. „	76	42	35
„ „ „ III. „	40	64	45
Mittlere Zahl der Contractionen . .	58	49	40
Grösse der mechanischen Arbeit . .	1730	1460	1200

Tabelle II. Versuchsperson N. P. (1899.)

Arbeit pro Contraction 6 kg-m.

	Datum					
	9. Nov.	8. Nov.	11. Nov.	24. Nov.	21. Nov.	23. Nov.
Belastung und Hubhöhe . . .	12 × 0·5	20 × 0·3	30 × 0·2	12 × 0·5	20 × 0·3	30 × 0·2
Zahl der Contractionen. I. R.	159	118	96	289	112	75
„ „ „ II. „	171	67	70	186	102	86
„ „ „ III. „	138	141	98	160	128	82
Mittl. Zahl der Contractionen	156	109	88	212	114	81
Grösse der mechan. Arbeit	2808	1954	1584	3810	2052	1458

Betrachten wir zuerst die in einem und demselben Versuch von der einen Reihe zur anderen erscheinenden Variationen, so finden wir, dass die Resultate bedeutende Schwankungen aufweisen. Bei S. S. ist die Zahl der während jeder Ermüdungsreihe ausgeführten Contractionen in einigen Versuchen (31. October, 1. November, 2. November und 18. November) ziemlich gleich, während in anderen bei den späteren Ermüdungsreihen die fortschreitende Ermüdung deutlich hervortritt (7., 17., 21. und 24. November), und wieder in anderen die Zahl der Contractionen von der einen Reihe zur anderen stetig zunimmt (26. und 29. October, 20. November). Auch bei N. P. treten dieselben Unregelmässigkeiten hervor.

Daraus folgt, dass man beim Vergleich der einzelnen Versuche nur mit grosser Vorsicht bestimmte Schlussfolgerungen ziehen darf.

Vergleichen wir wieder die zu verschiedenen Tagen bei einer und derselben Belastung und Hubhöhe ausgeführte Zahl der Contractionen,

so finden wir darin unverkennbare Andeutungen der fortschreitenden Uebung, wie es aus folgender Zusammenstellung der Durchschnittszahlen hervorgeht.

Belastung und Hubhöhe	Datum	Durchschn.-Zahl der Contraction.	Versuchs-person
25 × 0·2	31. October	78	S. S.
" "	16. Novbr.	127	
20 × 0·3	2. Novbr.	114	
" "	21. Novbr.	154	
30 × 0·2	1. Novbr.	39	
" "	23. Novbr.	50	
15 × 0·5	29. October	113	
" "	25. Novbr.	201	
12 × 0·5	9. Novbr.	156	N. P.
" "	24. Novbr.	212	

Aus dieser Zusammenstellung folgt, dass Versuche, welche zeitlich weit auseinander liegen, nicht ohne Weiteres unter einander verglichen werden dürfen.

Ich gehe jetzt zu der Frage über, wie sich die Ermüdung gestaltet, wenn bei der gleichen mechanischen Arbeit die Belastung und Hubhöhe in entgegengesetzter Weise verändert werden.

Bei einer Arbeit von 5 $^{kg\text{-}m}$ pro Contraction ist die Zahl der Contractionen bei S. S. im Mittel bei 10 × 0·5 : 329, bei 20 × 0·25 : 139 und bei 25 × 0·2 : 78 (27. bis 31. October); 16 Tage später bei 25 × 0·2 : 127. Also nimmt hier bei zunehmender Belastung und entsprechender Abnahme der Hubhöhe die bis zu eintretender Ermüdung ausgeführte Leistung entschieden ab, und zwar tritt dieses Ergebniss bei den Versuchen am 27. und 31. October in allen einzelnen Ermüdungsreihen deutlich hervor.

Mit einer Arbeit von 6 $^{kg\text{-}m}$ sind an S. S. zwei Versuchsreihen ausgeführt. In der ersten, vom 1. bis 3. November, ist die Zahl der Contractionen im Durchschnitt bei 12 × 0·5 : 343 (die erste Ermüdungsreihe), bei 20 × 0·3 : 114 und bei 30 × 0·2 : 39. Im ersten Versuche (vom 3. November) wurde bei der 2. und 3. Ermüdungsreihe Arbeit mit bezw. 30 × 0·2 und 20 × 0·3 ausgeführt, und zwar verhält sich dabei die Zahl der Contractionen ganz in derselben Weise, als bei den Versuchen am 1. und 2. November (56, bezw. 102 Contractionen).

Die zweite Reihe mit 6 $^{kg\text{-}m}$ Arbeit pro Contraction giebt ganz dasselbe Ergebniss:
12 × 0·5 : 338, 15 × 0·4 : 316, 20 × 0·3 : 154, 30 × 0·2 : 50 Contr.

In diesen beiden Reihen stellt es sich ganz wie bei der Reihe mit 5 $^{kg\text{-}m}$ Arbeit heraus, dass auch in den einzelnen Ermüdungsreihen die Zahl der Contractionen sich in derselben Weise verhält, als die Durchschnittszahlen. Ueberall ist bei 30 × 0·2 die Zahl der Contractionen geringer als bei 20 × 0·3, und bei dieser Combination geringer als bei 15 × 0·4, bezw. 12 × 0·5. Nur bei 15 × 0·4 und bei 12 × 0·5 verwischt sich das Resultat, was unzweifelhaft damit zusammenhängt, dass in diesen Versuchen die Differenz der Belastung nur 3 ^{kg} beträgt.

Die Versuche mit 7·5 $^{kg\text{-}m}$ Arbeit bei jeder Contraction ergeben dasselbe: bei 15 × 0·5 ist die Zahl der Contractionen beträchtlich grösser, als bei 25 × 0·3, sogar wenn wir den Versuch vom 29. October mit den viel späteren, wo doch die Versuchsperson an diesen Versuchen schon verhältnissmässig geübt war, zum Vergleich wählen.

Endlich folgt aus den Versuchen mit 10 $^{kg\text{-}m}$ Arbeit pro Contraction ganz dasselbe, obgleich die absolute Zahl der Contractionen, entsprechend der grossen Arbeitsleistung bei jedem Hub, verhältnissmässig klein ist.

Die an S. S. gewonnenen Resultate finden sich bei den an N. P. ausgeführten vollständig wieder. Bei den Versuchen vom 8. bis 11. November beträgt die durchschnittliche Zahl der Contractionen bei 12 × 0·5 : 156, bei 20 × 0·3 : 109 und bei 30 × 0·2 : 88, und bei den Versuchen vom 21. bis 24. November bezw. 212, 114 und 81.

Diese Versuche zeigen also, dass bei gleicher Arbeitsleistung in mechanischem Sinne die Grösse der Belastung einen sehr bedeutenden Einfluss auf das Erscheinen der Ermüdung ausübt, indem diese um so schneller eintritt, je grösser die Belastung ist. Die am längsten dauernde und daher auch grösste Arbeitsleistung wird also erhalten, wenn die Belastung nicht zu gross ist — immer vorausgesetzt, dass die Arbeit in mechanischem Sinne bei jeder Contraction dieselbe ist.

Dieses Ergebniss wird durch folgende Versuche kräftig unterstützt. Dieselben sind in ganz derselben Weise, wie die früheren, ausgeführt worden, indess mit dem Unterschied, dass in dem einzelnen Versuche die Belastung, die Hubhöhe oder sogar die mechanische Arbeit von der einen Reihe zur anderen verändert wurde.

Tabelle III. Versuchsperson N. P.

Arbeit pro Contract. kg-m	Datum	Reihe des Versuches	Belastung und Hubhöhe	Zahl der Contraction.	Mittel	Grösse der mech. Arbeit (Mittel)
2·5	12. Nov.	I.	25 × 0·1	235		
2·5	„	II.	„	180	195	488
2·5	„	III.	„	170		
5	30. Nov.	III.	10 × 0·5	507	506	2530
5	1. Dec.	I.	„	505		
5	„	II.	25 × 0·2	141	141	705
7·5	29. Nov.	III.	15 × 0·5	246	288	2160
7·5	30. Nov.	II.	„	329		
10	29. Nov.	I.	20 × 0·5	185		
10	„	II.	„	139	156	1560
10	30. Nov.	I.	„	145		
10	28. Nov.	I.	25 × 0·4	63		
10	„	II.	„	54	66	660
10	„	III.	„	80		
12·5	2. Dec.	I.	25 × 0·5	55	55	688

Tabelle IV. Versuchsperson V. O. S.

Arbeit pro Contract. kg-m	Datum	Reihe des Versuches	Belastung und Hubhöhe	Zahl der Contraction.	Mittel	Grösse der mech. Arbeit (Mittel)
5	9. Jan. 1900	I.	25 × 0·2	74	74	370
5	„	II.	20 × 0·25	141	162	810
5	„	III.	„	183		
6	14. Dec. 1899	I.	15 × 0·4	198	233	1398
6	25. Dec. „	II.	„	267		
6	3. Dec. „	I.	20 × 0·3	130		
6	17. Dec. „	II.	„	176	156	936
6	„	III.	„	162		
6	3. Dec. „	II.	30 × 0·2	41	41	246
7·5	4. Dec. „	I.	15 × 0·5	117	117	868
7·5	8. Jan. 1900	I.	25 × 0·3	82	82	615
8	14. Dec. 1899	III.	20 × 0·4	54		
8	16. Dec. „	II.	„	69	67	536
8	25. Dec. „	I.	„	78		
10	14. Dec. „	I.	25 × 0·4	34		
10	16. Dec. „	I.	„	41	41	410
10	25. Dec. „	III.	„	47		

Bei der Versuchsperson N. P. (Tab. III) ist die Zahl der Contractionen bei 10 × 0·5 kg-m im Mittel 506, während sie bei 25 × 0·1 kg-m, also bei einer 50 Proc. kleineren Arbeit, im Mittel nur 195 beträgt. Bei 25 × 0·2 kg-m ist die Zahl der Contrationen 141, bei 15 × 0·5 aber 288. In letzteren Falle ist die mechanische Arbeit 3 Mal so gross als bei 25 × 0·1, und dessen ungeachtet ist die Zahl der Contractionen hier beträchtlich grösser. Bei 20 × 0·5 ist die Zahl der Zuckungen 156, bei 25 × 0·4 aber nur 66.

Bei der Versuchsperson V. O. S. (Tab. IV) begegnen wir der grössten Zahl der Constructionen (im Mittel 233) bei 15 × 0·4. Bei derselben mechanischen Arbeit, aber grösserer Belastung (20 × 0·3 bezw. 30 × 0.2) beträgt die Zahl der Contractionen nur 156 bezw. 41. Bei einer Arbeit von 5 kg-m ist die Zahl der Contractionen bei 25 × 0·2 nur 74 und bei 20 × 0·25: 162, während bei 15 × 0·5 die Zahl der Contractionen 117 beträgt u. s. w.

Endlich stelle ich in Tab. V einige weitere, an mir selbst ausgeführte Versuche zusammen, welche in ganz derselben Richtung wie die schon besprochenen ausgefallen sind. Bei 15 × 0·3 hat die Zahl der Contractionen ihr Maximum, welches beträchtlich höher ist als bei 20 × 0·1, bezw. 20 × 0·2 und 25 × 0·1. Die Zahl der Contractionen bei 20 × 0·3 ist im Mittel fast ebenso gross, als bei 25 × 0·1; bei 17·5 × 0·5 ist sie entschieden grösser, als bei 20 × 0·4.

Tabelle V. Versuchsperson S. S.

Arbeit pro Contract. kg-m	Datum	Reihe des Versuches	Belastung und Hubhöhe	Zahl der Contraction.	Mittel	Grösse der mech. Arbeit (Mittel)
2	8. Nov.	I.	20 × 0·1	289		
2	„	II.	„	235	271	1626
2	„	III.	„	289		
2·5	15. Nov.	I.	25 × 0·1	178		
2·5	„	II.	„	195	186	1393
2·5	„	III.	„	184		
4	9. Nov.	I.	20 × 0·2	146		
4	„	II.	„	172	165	1980
4	„	III.	„	178		
4·5	5. Nov.	I.	15 × 0·3	405		
4·5	„	II.	„	377	360	4860
4·5	„	III.	„	298		

Tabelle V. (Fortsetzung.)

Arbeit pro Contract. kg-m	Datum	Reihe des Versuches	Belastung und Hubhöhe	Zahl der Contraction.	Mittel	Grösse der mech. Arbeit (Mittel)
6	10. Nov.	I.	20 × 0·3	137		
6	"	II.	"	211	192	3456
6	"	III.	"	227		
8	13. Nov.	I.	20 × 0·4	114		
8	"	II.	"	86	90	2160
8	"	III.	"	70		
8·75	26. Nov.	I.	17·5×0·5	127		
8·75	"	II.	"	113	121	3176
8·75	"	III.	"	124		
11·25	27. Nov.	I.	22·5×0·5	76		
11·25	"	II.	"	86	79	2666
11·25	"	III.	"	75		
12·5	19. Nov.	I.	25 × 0·5	26		
12·5	"	II.	"	35	30	1125
12·5	"	III.	"	29		

Dass sich keine directe Abhängigkeit zwischen der Arbeit in mechanischem Sinne und physiologischer Arbeitsfähigkeit vorfindet, sondern dass die letztere vor Allem von der Grösse des zu hebenden Gewichtes bestimmt wird, geht, wie es mir scheint, äusserst deutlich aus der Tab. VI (s. nächste Seite) hervor, in welcher ich alle meine Versuche nach der mittleren Zahl der bei einer gewissen Belastung und Hubhöhe ausgeführten Contractionen zusammengestellt habe. Um die von Zufälligkeiten bedingten Variationen so weit als möglich auszuschliessen, habe ich, wie ersichtlich, die Intervallen ziemlich gross gewählt.

Bei einer mechanischen Arbeit von 12·5 $^{kg\text{-}m}$ (25 × 0·5) habe ich nicht mehr als 50 Contractionen machen können; der Apparat gestattete keine grössere Hubhöhe als 0·5 ^{m}, ich konnte demnach nicht eine Arbeit dieser Grösse bei geringerer Belastung ausführen. Aus demselben Grunde war es nicht möglich, eine Arbeit von 10 $^{kg\text{-}m}$ mit geringerer Belastung als 20 ^{kg} auszuführen. Derartige Arbeitsmengen können also nicht zur Erörterung der von mir gezogenen Schlussfolgerung dienen.

Bei einer Arbeit aber von 7·5 $^{kg\text{-}m}$ pro Contraction finden wir bei einer Belastung von 25 ^{kg} nicht mehr als 100 Contractionen, wäh-

Tabelle VI. Versuchsperson S. S.

Zahl der Contraction.	Belastung und Hubhöhe	Mechan. Arbeit	Zahl der Contraction.	Belastung und Hubhöhe	Mechan. Arbeit
< 50	30 × 0·2	6	101—150	20 × 0·3	6
	„	6		15 × 0·5	7·5
	25 × 0·4	10		17·5×0·5	8·75
	20 × 0·5	10	151—200	25 × 0·1	2·5
	25 × 0·5	12·5		20 × 0·2	4
51—100	25 × 0·2	5		20 × 0·3	6
	30 × 0·2	6		„	6
	25 × 0·3	7·5	201—250	15 × 0·5	7·5
	„	7·5	251—300	20 × 0·1	2
	20 × 0·4	8	301—350	10 × 0·5	5
	20 × 0·5	10		12 × 0·5	6
	22·5 × 0·5	11·25		„	6
101—150	20 × 0·25	5		15 × 0·4	6
	25 × 0·2	5	351—400	15 × 0·3	4·5
	20 × 0·3	6			

Versuchsperson N. P.

51—100	30 × 0·2	6	151—200	25 × 0·1	2·5
	„	6		12 × 0·5	6
	25 × 0·4	10		20 × 0·5	10
	25 × 0·5	12·5	201—250	12 × 0·5	6
101—150	25 × 0·2	5	251—300	15 × 0·5	7·5
	20 × 0·3	6	> 400	10 × 0·5	5
	„	6			

Versuchsperson O. S.

< 50	30 × 0·2	6	101—150	15 × 0·5	7·5
	25 × 0·4	10	151—200	20 × 0·25	5
51—100	25 × 0·2	5		20 × 0·3	6
	25 × 0·3	6	201—250	15 × 0·4	6
	20 × 0·4	8			

rend bei 15^{kg} Belastung die Zahl der Contractionen mehr als 200 beträgt.

Noch deutlicher tritt die betreffende Gesetzmässigkeit bei $6^{kg\text{-}m}$ Arbeit hervor. Bei 30^{kg} Belastung wurden weniger als 100 Contractionen gemacht, bei 20^{kg} etwa 200, bei 12^{kg} mehr als 300.

Auch die an N. P. und O. S. ausgeführten Versuche führen zu demselben Resultat; eine nähere Erörterung derselben dürfte aber hier nicht nöthig sein.

Ich glaube daher berechtigt zu sein, als Ergebnisse dieser Versuche folgende Sätze auszusprechen:

1. Arbeitsgrössen, welche in mechanischem Sinne gleich sind, können in physiologischer Hinsicht sehr verschieden sein.

2. Die Zahl der Contractionen bis zur Ermüdung ist bei gleich grosser mechanischer Arbeit grösser, wenn die Belastung verhältnissmässig klein ist.

Hieraus folgt, dass

3. die Anstrengung bei der Arbeit weniger von der Grösse der mechanischen Leistung, als von der absoluten Grösse der Belastung abhängig ist.

Als Maass der physiologischen Anstrengung bei einer gewissen Arbeit konnte man die Zahl der Contractionen bis zu eintretender Ermüdung auffassen, und also als physiologisch äquivalent diejenigen Combinationen bezeichnen, bei welchen die Zahl der Contractionen dieselbe gewesen ist. Aus der Tab. VI würde sich demnach etwa Folgendes ergeben:

Versuchsperson S. S.	Zahl d. Contr.
30 × 0·2 = 25 × 0·5 bis 0·4 = 20 × 0·5	< 50
30 × 0·2 = 25 × 0·3 bis 0·2 = 22 × 0·5 = 20 × 0·5 bis 0·4	51—100
25 × 0·2 = 20 × 0·3 = 17 × 0·5	101—150
25 × 0·1 = 20 × 0·3 bis 20 × 0·2	151—200
u. s. w.	

Aus dieser Zusammenstellung lässt sich, in Uebereinstimmung mit dem früher Dargestellten, folgern, dass bei physiologisch äquivalenter Arbeit die Zunahme der Belastung von einer verhältnissmässig grösseren Abnahme der Hubhöhe begleitet wird, und es liegt nahe, zu untersuchen, inwiefern sich bestimmte Zahlenangaben in dieser Richtung aufstellen lassen. Leider ist aber das thatsächliche Material, welches zu meiner Verfügung steht, lange nicht genügend, um zu gestatten, eine solche Berechnung auszuführen, wie ich auch ausdrücklich bemerken will, dass die soeben zusammengestellten Zahlen der physiologischen Aequivalente nur darum mitgetheilt sind, um zu zeigen, wie die vorliegende Frage, meiner Meinung nach, zu behandeln ist, und also keineswegs beabsichtigen, diese Frage bestimmt zu beantworten.

Ich gestatte mir, noch einen Versuch mitzutheilen, den ich mit Hinsicht auf das interessante Resultat, welches Treves über die Aus-

dauer bei statischer Arbeit unlängst mitgetheilt hat, ausgeführt habe. Treves fand, dass bei statischer Arbeit, d. h. bei Hochhaltung eines Gewichtes, ohne dasselbe zu heben, das Product des Gewichtes durch die Zeit constant war. Ich konnte allerdings nur einen Versuch in dieser Richtung ausführen, theile ihn indessen hier mit, da ich zur Zeit dieses Versuches (3. Dec.) schon ziemlich trainirt war. Zum Vergleich stelle ich einen Versuch von Treves[1] mit dem meinigen zusammen.

Versuchsperson von Treves. 15. April 1899				Versuchsperson S. S. 3. December 1899			
Gewicht in Gramm (P)	Zeit in 2″ (T)	P × T	Verhältniss-Zahlen	Gewicht in Gramm (P.)	Zeit in 2″ (T)	P × T	Verhältniss-Zahlen
14 806	71·2	1 054 187	0·93	15 000	360	5 400 000	4·6
20 153	64·3	1 295 837	1·14	20 000	232·5	4 650 000	4·0
23 511	47·6	1 119 123	0·99	25 000	81·2	2 030 000	1·7
32 000	35·3	1 129 600	1·00	30 000	39·0	1 170 000	1·0

Die Zahlen von Treves und die meinigen unterscheiden sich also sehr wesentlich von einander. Die Ursache dieses Unterschiedes liegt zum Theil wohl darin, dass ich die gesammte Armmuskulatur, Treves aber nur den einen Biceps benutzte. Dieser Unterschied genügt aber nicht, um die stattfindenden Differenzen zu erklären. Dass das Product P × T bei meinem Versuch um so kleiner wird, je grösser die Belastung, steht übrigens in vollkommener Uebereinstimmung mit den übrigen Erfahrungen, die ich über den Einfluss der Belastung auf die Leistungsfähigkeit der Muskeln gewonnen habe. Vielleicht kann die Differenz doch daraus erklärt werden, dass die Versuchsperson von Treves kräftiger war, als ich, denn bei der grössten Belastung konnte diese mit nur einem Biceps das Gewicht fast ebenso lange gehoben halten, als ich mit der gesammten Muskulatur der beiden Arme.

II.

Im Jahre 1897 versuchten Binet und Vaschide unter Anwendung des gewöhnlichen Dynamometers Regnier's die Muskelkraft bei 83 Schülern in zwei Schulen zu bestimmen. Jeder Schüler hatte das Dynanometer abwechselnd mit der linken und der rechten Hand 5 bis

[1] Treves, *Archiv f. die ges. Physiol.* 1899. Bd. LXXVIII. S. 181.

10 Mal zu drücken. Aus ihren Versuchen ziehen die Verfasser den Schluss, dass sich die Muskelkraft bei verschiedenen Individuen in verschiedener Weise entwickelt und stellen in dieser Hinsicht für die jüngeren Knaben vier Typen: 1. Type de la décroissance brusque, puis stationnaire; 2. Type stationnaire; 3. Type de la décroissance continue; 4. Type de croissance continue, sowie für die älteren drei Typen auf: 1. Type stationnaire; 2. Type de croissance; 3. Type de décroissance.[1] Bei jeder Versuchsperson wurde indess nur ein Mal die Reihe ausgeführt; die Einwirkung der Uebung und zufällige Einflüsse wurden also hier gar nicht berücksichtigt.

Um diese Ergebnisse näher zu prüfen, habe ich die Versuche von Binet und Vaschide bei erwachsenen Menschen wiederholt, und zwar mit dem Unterschiede, dass bei jeder Versuchsperson mehrere Reihen an verschiedenen Tagen ausgeführt wurden.[2] In jeder Reihe hatte jede Versuchsperson das Dynamometer mit der grössten Willensanstrengung abwechselnd mit jeder Hand 15 Mal zu drücken; bei den zwei und drei letzten Pressionen wurde die Versuchsperson nochmals aufgefordert, die grösstmögliche Muskelarbeit zu leisten. Um die Einwirkung zufälliger Einflüsse so weit möglich auszuschliessen, habe ich für jede Reihe das Mittel aus je 3 nacheinander folgenden Pressionen 1. bis 3., 4. bis 6., 7. bis 9. u. s. w.) berechnet, und schliesslich, um den wirklichen Typus festzustellen, aus allen an einer und derselben Versuchsperson ausgeführten Versuchsreihen das Mittel für die 1. bis 3., 4. bis 6., 7. bis 9., 10. bis 12., 13. bis 15. Pression gezogen.

Es würde viel zu viel Raum beanspruchen, wollte ich alle meine Reihen hier in extenso mittheilen. Ich bemerke nur, dass bei keiner einzigen unter meinen 10 Versuchspersonen der gleiche Typus (im Sinne Binet's und Vaschide's) an den verschiedenen Versuchstagen erschienen ist; im Gegentheil kamen von dem einen Tage zum anderen ganz verschiedene Typen zum Vorschein, und man könnte die Zahl der von diesen Autoren aufgestellten Typen noch um einige andere vermehren, bei welchen Zu- nnd Abnahme der Muskelkraft ganz unregelmässig auftritt, was wahrscheinlich mit den Antriebswirkungen im Zusammenhange stand.

Auch hat die „Tagesdisposition“ auf den Typus einen deutlichen Einfluss ausgeübt, wie es aus der Tab. VII hervorgeht. Diese Tabelle ist in der Weise berechnet, dass alle Tage, an welchen das Mittel

[1] Binet et N. Vaschide, *L'année psychologique.* Vol. 4. Paris 1898.

[2] Die Versuche wurden zum grössten Theil nach meiner Rückkehr von Stockholm in Moskau ausgeführt.

sämmtlicher Pressionen grösser als das Gesammtmittel für die betreffende Versuchsperson gewesen ist, als Tage mit guter Disposition bezeichnet sind, während die Tage, deren Mittel dem Gesammtmittel entspricht, als Tage mittlerer Disposition, und endlich die Tage, wo das Mittel kleiner als das Gesammtmittel war, als Tage mit schlechter Disposition aufgenommen sind.

Tabelle VII.

Typen	stat.	croiss.	décroiss	irrég.	Summa
			Rechte Hand.		
Gute Dispos.	2	3	2	2	9
Mittl. Dispos.	1	1	10	8	20
Schlechte D.	—	2	5	4	11
			Linke Hand.		
Gute Dispos.	2	1	5	1	9
Mittl. Dispos.	1	—	14	6	21
Schlechte D.	—	1	5	4	10

Wie aus der Tabelle ersichtlich, kommen bei guter Disposition alle Typen vor, bei mittlerer und schlechter Disposition sind Types décroiss. und irrég. vorherrschend.

Aus diesen Erfahrungen folgt, dass der individuelle Typus der Entwickelung der Muskelkraft durch eine einzelne Reihe mit dem Dynamometer nach dem Vorgange von Binet und Voschide nicht einwurfsfrei bestimmt werden kann. Nur als Mittel von mehreren Reihen lassen sich bei verschiedenen Individuen verschiedene Typen aufstellen, welche indess, wie der folgenden Tab. VIII (s. nächste Seite) hervorgeht, nur selten ein wirklich charakteristisches Gepräge darbieten.

Unter den in dieser Tabelle aufgenommenen Versuchsresultaten finden wir keinen einzigen deutlichen Type croissant. Unverkennbare Beispiele eines Type décroissant baben wir in Nr. 4 (L. H.), 6 (R. H., L. H.), 8 (L. H.), 9 (L. H.), 10 (R. H., L. H.), also insgesammt in 7 Fällen von 20. Einem deutlichen Type stationnaire begegnen wir in Nr. 3 (R. H.), 7 (R. H.), 8 (R. H.), 9 (R. H.), also in 4 Fällen. Die übrigen 9 Fälle scheinen mir so unregelmässig zu verlaufen, dass sie nur mit Schwierigkeit als einem bestimmten Typus zugehörig aufgefasst werden können.

Da diese unregelmässigen Fälle aber die zahlreichsten sind, ist es kaum anzunehmen, dass die Methode von Binet und Vaschide ge-

eignet wäre, wichtigere Aufschlüsse über die „Entwickelung der Muskelkraft“ bei verschiedenen Individuen zu gestatten.

Zum Schluss möchte ich nochmals meinen herzlichsten Dank an Herrn Prof. R. Tigerstedt für den liebenswürdigen Vorschlag der Arbeit, für stetes Interesse, Aufmunterung und Hülfe bei der Arbeit selbst, als auch bei der Bearbeitung des gewonnenen Materials ausdrücken.

Tabelle VIII.

Mittel der Pressionen	1. V. O. S.		2. F. W.		3. J. S.		4. J. D.		5. S. K.	
	R. H.	L. H.	R. H.	L. H.	R. H.	L. H.	R. H.	L. H.	R. H.	L. H.
1.—3.	32·2	27·2	42·1	39·8	41·5	38·2	44·9	40·3	37·7	35·8
4.—6.	33·2	27·6	42·5	40·6	41·3	38·1	43·2	36·8	38·2	35·0
7.—9.	33·3	27·2	43·0	39·7	41·3	37·2	41·9	35·3	37·0	34·1
10.—12.	32·9	25·8	42·7	39·2	41·1	36·9	42·0	35·0	36·0	35·3
13.—15.	33·0	25·6	43·1	39·1	41·3	37·4	43·1	35·2	36·0	33·4
Allg. Mittel	32·9	26·9	42·7	39·7	41·3	37·5	43·1	36·5	37·0	34·6

Mittel der Pressionen	6. S. S.		7. J. G.		8. N. C.		9. T. W.		10. M. P.	
	R. H.	L. H.	R. H.	L. H.	R. H.	L. H.	R. H.	L. H.	R. H.	L. H.
1.—3.	35·5	32·3	39·2	35·1	47·7	40·4	37·5	40·8	35·8	35·2
4.—6.	34·4	31·1	38·7	34·1	47·1	41·5	38·7	38·3	34·4	33·1
7.—9.	33·9	31·4	37·7	33·7	46·8	38·7	37·6	36·8	33·5	34·0
10.—12.	31·6	30·1	38·5	34·3	47·1	39·2	37·3	34·6	32·6	32·8
13.—15.	32·7	28·6	38·1	34·1	47·1	37·1	38·2	35·4	32·0	32·5
Allg. Mittel	33·5	30·7	38·4	34·2	47·2	39·4	37·8	37·1	33·7	33·5

Anmerkung. Die Zahlen stellen Mittel aus je 5 Versuchstagen dar; nur bei den 3 letzten Versuchspersonen beziehen sich die mittleren Werthe auf je 3 Versuchstage.

Ueber die Bewegungen im Handgelenke des Menschen.[1]

Eine röntgographische Studie

von

Gösta Forssell.

(Aus der anatomischen Anstalt des Carolinischen medico-chirurgischen Institutes in Stockholm.)

(Hierzu Taf. V—VII).

Das Handgelenk ist eines der Gelenke, deren Form und Dimensionen ganz besonders eine Untersuchung mittels Röntgenlicht gestatten. Eine derartige Untersuchung muss um so dankbarer sein, als der anatomische Bau dieses Gelenkes einer exacten Analyse desselben nach den für das Studium der Gelenke sonst gebräuchlichen Methoden fast unüberwindliche Hindernisse in den Weg stellt. Mehrere Autoren haben auch bereits Radiogramme des Handgelenkes geschildert, nämlich T. H. Bryce (1), E. Zuckerkandl (2), H. Virchow (3 bis 5), A. Bühler (6) und E. R. Corson (7). Die erstgenannten Forscher — Corson's Abhandlung stand mir nicht zur Verfügung — beschäftigen sich nur mit den Abductionsbewegungen und sind zu wesentlich verschiedenen Resultaten gekommen. Ueberdies sind sie nicht röntgographisch geübt gewesen, und die Reproductionen der von ihnen studirten Röntgogramme geben bei näherer Prüfung an die Hand, dass die Bilder derselben Serie nicht mit der wünschenswerthen Gleichförmigkeit ausgeführt worden sind.

In Folge dessen war eine neue Untersuchung von Interesse, und zwar sowohl, um eine genauere Kenntniss von den Abductionsbewegungen zu erhalten, wie auch den Verlauf bei der Dorsal- und Volarflexion zu erforschen zu suchen.

---

[1] Bei der Redaktion am 10. April 1901 eingegangen.

I. Untersuchungsmethode.

Ulnare und radiale Abduction.

Radiographirung des Handgelenkes in sagittaler Richtung habe ich mit erwünschtem Resultat in fünf Fällen ausgeführt, von denen drei Dorsalbilder (die dorsale Seite der Hand nach der Platte) sind, während zwei Fälle von sowohl Dorsal- als Volarbildern repräsentirt sind.

Bei der Radiographirung ist folgendes Verfahren angewandt worden:

Der Vorderarm ist auf einer planen Unterlage fest fixirt und während der Radiographirung der verschiedenen Lagen der Hand in derselben Stellung belassen worden. Die Fixirung suchte ich während der ersten Zeit der Untersuchung dadurch zu erlangen, dass ich über den Vorderarm und das Ellbogengelenk Sandbeutel placirte. Bei drei Fällen (I bis III) von den zahlreichen Radiographirungen, die ich mit dieser Anordnung ausführte, gelang es mir, eine befriedigende Fixirung des Radius zu erhalten. Bei den später aufgenommenen Radiographien (Fall IV und V) habe ich den Vorderarm mit einem besonders dafür construirten Apparat fixirt, auf welchem der Vorderarm mit breiten Riemen oberhalb des Handgelenkes und unterhalb des Ellbogens an eine plane Scheibe sicher befestigt und ausserdem noch wie vorher mit Sandbeuteln umgeben wurde. Hierdurch wurde eine gute Fixirung erreicht. Eine Eingipsung des Vorderarmes ist auch versucht worden, doch zeigte es sich, dass einer störenden Rotation in den Radioulnargelenken durch den Gipsverband nicht vorgebeugt werden konnte.

Die Röntgenlampe ist mit dem Antikathodenspiegel parallel zu der Ebene, an die der Unterarm befestigt war, eingestellt worden, und — die Hand in gestreckter Stellung — über der Mittellinie in gleicher Höhe mit den Eminentiae carpi oder 2 ^{cm} distal von dem dorsalen Rande der Gelenkfläche des Radius gegen den Carpus genau centrirt worden.

In diesem Lageverhältniss zu dem gleichfalls fixirten Vorderarm ist die Lampe bei der Radiographirung der verschiedenen Pausen der Abductionsbewegung unverrückt geblieben.

Um zu bewirken, dass die verschiedenen Momente der Bewegung in einem und demselben Plane ausgeführt wurden, benutzte ich, wenn die dorsale Seite der Hand nach der Platte gewendet war, eine dünne hölzerne Scheibe, welche auf dem Handrücken festgespannt wurde, auf den Fingern und der halben Mittelhand ruhend, und die mit ihrer planen, unteren Fläche bei Ausführung der Bewegung gegen die Platte glitt, welche den Vorderarm trug. Ohne eine solche Vorkehrung ist es — wegen der gewölbten Form der Handwurzel und Mittelhand — meiner Erfahrung gemäss fast unmöglich, mit der Dorsalfläche nach der Photographieplatte bei Einnahme der verschiedenen Stellungen

dieselbe Neigung der Hand zur Unterlage beizubehalten. Wenn die Volarseite gegen die Platte gewendet wurde, begnügte ich mich damit, die Handfläche fest gegen dieselbe stützen zu lassen. Die Röntgenplatte wurde bei den Pausen der Bewegung mit grösster Vorsicht unter die Hand geschoben.

Bei Radiographirung der Abductionsstellungen von dem ulnaren bezw. radialen Rande der Hand war es nicht möglich, den Vorderarm in derselben Stellung zu behalten. Um Bilder zu bekommen, wo die Carpalknochen auf der nach der Platte gewandten Seite so wenig als möglich von den Knochen des Vorderarmes und der Mittelhand verdeckt waren, stellte ich die Hand so ein, dass die Mittelhand und der Vorderarm in maximaler Abductionsstellung ungefähr denselben Winkel gegen die Photographieplatte bildeten.

Wenn die Abduction nach der von der Platte abgewandten Seite ausgeführt wurde, ward die Handwurzel gegen die Platte gestützt. Wurde die Bewegung in entgegengesetzter Richtung ausgeführt, so wurde die Platte auf eine Unterlage möglichst nahe der Handwurzel placirt, stets so, dass Vorderarm und Mittelhand denselben Neigungsgrad zur Platte hatten. Der Antikathodenspiegel wurde über der Mitte des Winkels zwischen Vorderarm und Mittelhand eingestellt. Arm und Hand wurden mit der Dorsalfläche winkelrecht zur Unterlage placirt, und zwar so genau, als sich dies thun liess. Ich habe von verschiedenen Händen in diesen Stellungen Radiographien aufgenommen, aber nur von einer Hand mit gracilen Knochen (= Fall I der Flächenansichten) habe ich ein so gut gelungenes Bild erhalten können, dass die Contouren der Carpalknochen haben unterschieden und zugleich die vertikale Stellung hat beibehalten werden können.

Die Abductions- und Oppositionsbewegungen des Daumens habe ich mit Fixirung des Vorderarmes radiographirt, und zwar ebenso wie bei der Aufnahme der Flächenansichten von den Abductionsstellungen, und ausserdem mit Sandbeuteln über den Fingern, ausser dem Daumen, die Hand in fester Lage erhalten. Der Daumen ist bei der einen Exponirung, soweit dies durch die eigenen Muskeln möglich war, opponirt worden; bei einer anderen Exponirung ist eine maximale Abductionsbewegung des Daumens ausgeführt, die Hand aber übrigens wie auch Röntgenlampe und Vorderarm in ihrer Lage belassen worden. Der Daumen wurde in beiden Stellungen von Sandbeuteln gestützt.

Volar- und Dorsalflexion.

Röntgogramme der Volar- und Dorsalflexion von der ulnaren bezw. radialen Seite der Hand sind nach demselben Principe wie die

Flächenansichten der Abductionsstellungen aufgenommen worden: Fixirung des Vorderarmes und des Röntgenrohres während der verschiedenen Momente der Bewegung; Bewegungsplan parallel zur Photographieplatte. Die Antikathode wurde dicht distal von der Spitze des Proc. styl. radii oder über dem Os triquetrum eingestellt.

Vorderarm und Ellbogen wurden in Sandbeutel eingebettet.

Der Uebergang von der einen Stellung zur anderen muss äusserst vorsichtig geschehen und unter genauer Beachtung, dass der Frontalplan der Hand winkelrecht zur Platte erhalten und der Unterarm nicht verschoben wird. Dazu kommt die Schwierigkeit, photographisch gut gelungene Platten zu erhalten, weil hier eine längere Expositionszeit nöthig ist, um die Contouren der Carpalknochen hervortreten zu lassen, und weil Zitterbewegungen dann sehr schwer zu vermeiden sind.

Trotz aller Vorsichtsmaassregeln ist es mir deshalb nur in zwei Fällen gelungen, anwendbare Röntgogramme von diesen Stellungen zu erhalten, und dies auch nur nach wiederholten Röntgographirungen derselben Hände.

Bei der Aufnahme von Flächenansichten der Volar- und Dorsalflexion habe ich dieselbe Methode benutzt wie bei der Röntgographirung der Abductionsstellungen von der ulnaren oder radialen Handseite. Nach eingenommener Flexionsstellung wurde die Hand also so placirt, dass Vorderarm und Mittelhand einen gleichen Winkel zur Platte bildeten.

Galt es Bilder von der Dorsalseite der Hand aufzunehmen, so wurde bei Volarflexion die Handwurzel gegen die Platte gestützt; bei Dorsalflexion der Hand wurde eine schmale Platte auf eine Unterlage so nahe der Handwurzel wie möglich (ungefähr $^1/_2$ cm die grösste Entfernung) placirt. Mit ähnlicher Anordnung wurde die Volarseite röntgographirt.

Bei diesen Radiographirungen habe ich versucht, den radio-ulnaren Durchmesser des Vorderarmes parallel zur Platte beizubehalten, um einigermaassen correspondirende Contouren vom Radius zu erhalten.

Bei sämmtlichen Exponirungen sind die Finger von Sandbeuteln gestützt worden, um Zitterungen zu vermeiden und die Hand in der gewünschten Lage beizubehalten. Die Bewegungen des Handgelenkes sind durch seine eigene Musculatur ausgeführt, also keine passiven Bewegungen hervorgerufen worden. Die Röntgenlampe ist bei allen Exponirungen so placirt worden, dass der Mittelpunkt des Antikathodenspiegels sich 40 cm von der Photographieplatte befunden hat.

Die Radiogramme sind, ausser auf gewöhnlichen photographischen Kopien, in der Weise studirt worden, dass ich die Contouren der Knochen sorgfältig markirt habe, indem ich auf der Hautseite des Negativs feine Bleistiftpunkte mit ungefähr 1^{mm} Zwischenraum bei durchfallendem Lichte in dieselben zeichnete. Ueber die Hautseite des Negativs habe ich dann durchscheinendes Pauspapier straff gespannt, welches auf der Glasseite der Platte mit Siegellack befestigt wurde. Die punktirten Contouren werden gegen das Licht durch das Pauspapier scharf sichtbar und werden darauf gezeichnet.

Man kann zwar ohne vorhergehende Punktirung die meisten Contouren durch das Pauspapier hindurch unterscheiden, in vielen Fällen aber wird eine auf dem Negativ völlig deutliche Contour vom Papier verdeckt. Die auf dem Negativ ausgeführte und unter Vergleichung mit Knochenpräparaten genau überlegte Punktirung macht indess die Zeichnung weit sicherer. Man vermeidet durch dieselbe, das Papier abheben zu müssen, um eine unsichere Contour zu controliren. Dies ist eine zeitraubende und geduldprüfende Copirungsweise, die Vortheile aber, die sie bringt, sind ausserordentlich gross. Man erhält auf durchscheinendem Papier eine Contourenzeichnung, welche eine directe Copie des Radiogrammes ist, und kann dadurch, dass man die Bilder eines Knochens in verschiedener Stellung der Hand übereinander placirt, die Veränderungen in seiner Contour, wie die Verschiebung der umgebenden Knochen im Verhältniss zu demselben genau beobachten.

Der Zweck der nun beschriebenen Anordnung bei der Aufnahme der Flächenansichten der ulnaren und radialen Abductionsstellungen und der Randbilder der Volar- und Dorsalflexionsstellungen ist der gewesen, in den verschiedenen Pausen der Bewegung congruente Bilder von den Vorderarmknochen und eine Projection des Handskelettes auf einem Plane, parallel zum Bewegungsplane der Hand zu erhalten und die Lichtaxe (Vergrösserungsaxe) so nahe wie möglich mit der Rotationsaxe zusammenfallend zu verlegen.

Darum sind Vorderarm und Röntgenrohr fixirt worden; darum ist eine bestimmte Neigung der Handfläche gegen die Platte während jeder Bewegungsreihe beibehalten worden, und zu diesem Zwecke bin ich bestrebt gewesen, den Antikathodenspiegel so genau wie möglich über das Köpfchen des Capitatum zu centriren.

Ob diese Centrirung gelungen ist, kann nur durch das Resultat der Röntgographirung entschieden werden, indem dann die Knochen in der Hand, welche sich bei der Bewegung nur im Plane der Haupt-

bewegung bewegt haben, auf den Röntgographien derselben Reihe congruente Contouren zeigen werden.

•Nur nach einer mit Erfolg durchgeführten Anordnung der nun beschriebenen Art kann man nach einer Veränderung der Contour der Knochen auf den Röntgogrammen auf die von ihnen ausgeführten Bewegungen zu schliessen wagen. Denn fixirt man nicht den Vorderarm im Verhältniss zum Rohre, so wird dessen Projection äusserst leicht verändert, wodurch Schwierigkeit entsteht, die Verschiebung der Carpalknochen gegen denselben zu beurtheilen; behält die Hand nicht ihre Neigung gegen den Projectionsplan bei, dann können ganz irreführende Contourveränderungen in der Projection sämmtlicher Carpalknochen eintreten; fällt nicht die Lichtaxe durch das Rotationscentrum oder dessen unmittelbare Nähe, dann verändern trotz Beobachtung aller übrigen Vorsichtsmaassregeln auch die Knochen, welche während der Ausführung der Bewegung ihre Neigung zum Bewegungsplane beibehalten, ihre Contour.

Bei Aufnahme der Randbilder der Abductionsstellungen und der Flächenansichten der Flexionsstellungen hat es sich nicht machen lassen, bei der Röntgographirung der verschiedenen Stellungen von derselben Seite der Hand direct mit einander vergleichbare Bilder zu erhalten, sondern es ist meine Absicht gewesen, möglichst deutliche Bilder von den Carpalknochen und zugleich eine solche Einstellung der Lampe zu erzielen, dass man eine Projection des Handskelettes erhielt, die man verhältnissmässig leicht durch die winkelrecht zu diesen aufgenommenen Bildern controliren konnte.

Die Röntgogramme, welche dieser Untersuchung zu Grunde liegen, habe ich (Januar bis September 1900) in Dr. Thor Stenbeck's Röntgeninstitut ausgeführt, wo ich damals Assistent war. Für das Entgegenkommen, womit mir Dr Stenbeck Local und Röntgenlampe zur Verfügung gestellt hat, wie für seinen werthvollen Unterricht in der Röntgentechnik, möchte ich demselben hier meinen verbindlichsten Dank aussprechen.

Desgleichen ist es mir eine liebe Pflicht, Herrn Professor Erik Müller für das Interesse, welches er meiner Arbeit geschenkt hat, warm zu danken.

II. Bei der Analyse der Röntgogramme benutzte mathematische Sätze.

Wir betrachten die Bewegung in einem Plan bei einem Gelenksystem von folgendem Bau (Fig. 1). Gegen einen fixirten Körper $ABE_1 D_1$ mit

concaver, sphärischer Gelenkfläche $D_1 E_1$ bewegt sich eine Lamelle $D_1 E_1 G_1 F_1$, deren convexe Rotationsfläche in den Theilen, welche $D_1 E_1$ berühren, denselben Krümmungsradius R und dasselbe Rotationscentrum C hat wie diese Fläche.

Gegen die distale, concave Fläche dieser Lamelle führt wieder ein dritter Körper $F_1 G_1 L K$.

Deren correspondirende Rotationsflächen haben, wie wir annehmen, den Radius r und das Bewegungscentrum M.

Die Entfernung zwischen C und M ist $= a$ angenommen.

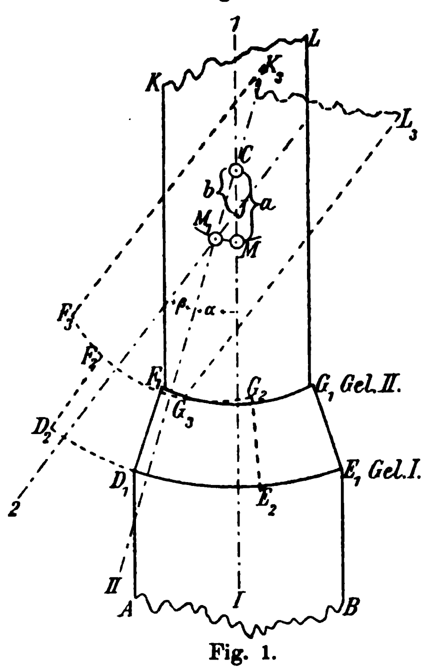


Fig. 1.

Als Ausgangsstellung wird die Lage gewählt, wo die Symmetrielinien (= bestimmte Normale zu den betr. Rotationsflächen) der drei Gelenksegmente zusammenfallen.

Eine Bewegung des Gelenksystems, wodurch das distale Gelenksegment von der Lage $F_1 G_1 L K$ nach der Lage $F_3 G_3 L_3 K_3$ verlegt wird, so dass dessen Symmetrielinie in der Lage 2 mit ihrer Richtung in der Lage 1 den Winkel $\alpha + \beta$ bildet, entsteht, wie angenommen, durch eine Bewegung in beiden Gelenken.

Diese in beiden Gelenken gleichzeitig ausgeführte Bewegung kann man sich in zwei Momente getheilt denken: 1. die Lamelle $D_1 E_1 G_1 F_1$ rotirt gegen das fixe Gelenksegment $A B E_1 D_1$ zur Lage $D_2 E_2 G_2 F_2$, so dass die Symmetrielinie in der Lage II den Winkel α mit der Ausgangslage I bildet. Durch diese Bewegung nimmt die Fläche $F_1 G_1$ die Lage $F_2 G_2$ ein, wobei deren Mittelpunkt M sich längs eines Kreisbogens verschoben hat, dessen Mittelpunkt C und dessen Halbmesser a ist, bis M_I. 2. Das distale Gelenksegment, welches an der Bewegung der Lamelle theilgenommen hat, als ob es mit derselben fest verbunden gewesen wäre, rotirt um den Mittelpunkt M_1 bis zur Lage $F_3 G_3 L_3 K_3$, so dass dessen Symmetrielinie in der Lage 2 mit der Symmetrielinie der Lamelle $D_2 E_2 G_2 F_2$ in deren Lage II den Winkel β bildet.

Die Symmetrielinie des distalen Segmentes in der Lage 2 wird ausgezogen, bis sie im Punkte J dieselbe Linie in ihrer Lage 1 schneidet.

Die Entfernung zwischen C und J nennen wir b.

Es gilt nun, bei einem doppelten Gelenke mit gewisser begrenzter Beweglichkeit in beiden Gelenken einen mathematischen Ausdruck für die Entfernung (a) zwischen den Mittelpunkten $(C$ und $M)$ der betreffenden

Gelenkflächen unter dem Verhältniss zu finden, dass die Projectionen einer gewissen Normalen zu der Rotationsfläche des distalen Segments unter verschiedenen Stellungen des Gelenksystems, wobei in beiden Gelenken eine Rotation stattgefunden hat, in einem Punkte einander schneiden, und ferner einen Ausdruck für die Lage dieses Schneidepunktes *(J)* im Verhältniss zu den Rotationscentren *(C* und *M)* zu finden.

Im $\triangle\, M_1 J C$ ist $\sphericalangle J M_1 C = \beta$ (Conjugationswinkel) und $\sphericalangle M_1 J C = 180^0 - (\alpha + \beta)$.

Ferner ist Seite $M_1 C = a$.

Nach dem Sinustheorem ist also

$$b : a = \sin\beta : \sin[180^0 - (\alpha + \beta)],$$

aber

$$\sin[180^0 - (\alpha + \beta)] = \sin(\alpha + \beta);\ \text{also ist } b = a \cdot \frac{\sin\beta}{\sin(\alpha + \beta)}.$$

Geschehen nun weitere Excursionen im Gelenksystem, wobei die Winkel aber α_1 und β_1 sind, dann erhält man einen ähnlichen Ausdruck für b_1:

$$b_1 = a \cdot \frac{\sin\beta_1}{\sin(\alpha_1 + \beta_1)}.$$

Der Unterschied in der Grösse zwischen b und b_1 ist s,

$$s = b - b_1 = a\left[\frac{\sin\beta}{\sin(\alpha + \beta)} - \frac{\sin\beta_1}{\sin(\alpha_1 + \beta_1)}\right],$$

aber $s = 0$. (Siehe oben.)

Hieraus folgt, dass entweder:

$$a = 0,$$

oder

$$\frac{\sin\beta}{\sin(\alpha + \beta)} - \frac{\sin\beta_1}{\sin(\alpha_1 + \beta_1)} = 0.$$

woraus hervorgeht:

$$\frac{\sin\beta}{\sin\beta_1} = \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin(\alpha_1 + \beta_1)}.$$

Die Beweglichkeit des in Rede stehenden Gelenkes ist indess der Art begrenzt, dass dieser letztere Ausdruck in keinem der untersuchten Fälle satisfiirt wird. (Siehe Tab. I.)

Daher ist, wenn $s = 0$, auch $a = 0$.

Dies bedeutet, dass, wenn bei Excursionen in einem doppelten Gelenk — mit genannter Begrenzung in den Bewegungen — die Projectionen einer gegebenen Normalen zu der Rotationsfläche des distalen Gelenksegmentes auf einem Plane parallel zum Bewegungsplan des Gelenkes während drei oder mehrerer Pausen der Bewegung einander in einem Punkte schneiden, die Bewegungen in beiden Gelenken um eine gemeinsame Axe erfolgt, welche durch den Schneidepunkt der Projectionen der gegebenen Normalen läuft. Da die Bewegung der beiden Gelenksegmente

um eine gemeinsame Axe stattfindet, folgt hieraus, dass man die Bewegung des distalen Gelenksegmentes so betrachten kann, als ob es sich mit einem einfachen Gelenk direct gegen den fixirten Theil des Gelenksystems bewegte.

Jeder mit dem distalen Gelenksegmente fest vereinigte Punkt beschreibt bei der Bewegung desselben einen Kreisbogen um das Rotationscentrum.[1] Eine Linie, gezogen zwischen zwei mit diesem Segment fest verbundenen Punkten, bleibt also während der ganzen Bewegung Tangente zu einem Kreisbogen mit dem Bewegungscentrum des Gelenkes als Mittelpunkt. Wenn man während zwei oder mehr Pausen der Bewegung Projectionen einer solchen Linie macht, wird man im Mittelpunkte eines der ihnen gemeinsamen Tangentenkreise die Lage des Rotationscentrums für das Gelenksystem finden, und verlegt man die Linie in genügende Entfernung von dem Punkte, wo man zu Folge der Curvatur der Gelenkflächen annehmen kann, dass dort der gemeinsame Mittelpunkt liegt, so bildet es keine Schwierigkeit, unter den Tangentenkreisen den richtigen zu wählen.

Ist der gefundene Punkt das Rotationscentrum für das ganze Gelenksystem, so wird er — wie gezeigt ist — im Laufe der Bewegung unverrückt bleiben, und die Projectionen von einer durch denselben laufenden, im Verhältniss zu dem distalen Gelenksegment fixen Linie werden also während aller Pausen der Bewegung in diesem Punkte einander schneiden. Aus der angeführten Deduction geht auch unmittelbar hervor, dass, wenn es verschiedene Bewegungscentren giebt, nicht die Projectionen von den Normalen der distalen Gelenkfläche in den verschiedenen Stellungen des Gelenkes einander in einem Punkte schneiden sollen, wenn die Excursionen in dem Gelenke in oben genannter Weise begrenzt sind.

III. Die ulnare und die radiale Abduction der Hand.

Bisher veröffentlichte Röntgenuntersuchungen.[2]

Wie erwähnt, haben die Autoren, welche sich mit Röntgenstudien, betreffend die Abductionsbewegungen der Hand, beschäftigen, wesent-

---

[1] „Rotationscentrum" bezeichnet hier den Schneidepunkt der Bewegungsaxe mit der Bewegungsebene bezw. deren orthogonale Projection auf derselben Ebene.

[2] Im August 1901 erschien die Abhandlung des Herrn Prof. Rudolf Fick: „*Ueber die Bewegungen in den Handgelenken*", Abhandl. d. math.-phys. Cl. d. Königl. Sächs. Ges. d. Wiss. Bd. XXVI. Nr. 6. S. 419 bis 468. Leipzig 1901. In dieser Arbeit erwähnt der Verfasser die Inauguraldissertation des Herrn Dr. H. J. Lyklama à Nijeholt: „*De onderlinge Verhouding der Beenderen van den Voorarm en van den Handwortel by verschillende Standen van der Hand*". Leiden 1900, welche mir vorher nicht bekannt war. Da ich meinen Aufsatz schon im März 1901 abgeschlossen hatte, sind die Resultate dieser Forscher in demselben nicht erwähnt worden, wie sie auch meine Arbeit nicht haben beeinflussen können.

lich verschiedene Resultate erhalten sowohl hinsichtlich des Grades, in welchem jedes der beiden Gelenke an den Bewegungen betheiligt ist, wie hinsichtlich der Stellungsveränderungen der einzelnen Knochen bei Ausführung der Abductionsbewegungen.

Die Röntgogramme von T. H. Bryce (1) sind durch Ungleichförmigkeit bei der Röntgographirung, sowie durch die Unvollkommenheit der damaligen Technik (Frühjahr 1896) nachtheilig beeinflusst worden. Die folgenden Schlüsse des Verfassers aus seinem Material scheinen mir doch berechtigt zu sein: Die Carpalreihen sind lockerer an einander gefügt, als gewöhnlich angenommen worden war. Bei gestreckter Hand steht das Hamatum nicht in Contact mit dem Lunatum, welches sowohl gegen den Radius, als gegen den Discus ruht. Das Triquetrum berührt dabei den Discus nicht. Sowohl bei ulnarer, wie bei radialer Abduction findet eine seitliche Excursion im Intercarpalgelenke statt, bei ulnarer Abduction auch im Radiocarpalgelenke. Das Naviculare rotirt bei radialer Abduction volarwärts, bei ulnarer dorsalwärts. Bei radialer Abduction wird der distale Theil der ulnaren Gelenkfläche des Hamatum entblösst; bei ulnarer Abduction klafft der Spalt zwischen Multangula und Naviculare.

E. Zuckerkandl (2) ist der Ansicht, dass die Abductionsbewegungen zum allergrössten Theil im Radiocarpalgelenk ausgeführt werden, welches sowohl an der ulnaren als radialen Abduction theilnimmt. Das Intercarpalgelenk dagegen besitzt weit geringere Beweglichkeit, nimmt aber je nach seiner Excursionsfähigkeit nach beiden Seiten an der Bewegung theil.

H. Virchow (3 bis 5), welcher X-Aufnahmen von der Hand in Abductionsstellungen von der dorsalen wie volaren Handfläche und von dem radialen Rande der Hand studirt, aber nur Flächenansichten publicirt hat, verdanken wir eine sehr gründliche Beschreibung der Veränderungen in der Handwurzel bei den Abductionsbewegungen. Die Röntgogramme hat er mit „Gefrierskelettpräparaten" verglichen.

Hinsichtlich der Excursionsfähigkeit der beiden Gelenke ist er zu einem von Zuckerkandl abweichenden Resultat gekommen, indem er die Bewegung in beide Gelenke verlegt, hält aber dafür, dass das Intercarpalgelenk grössere Beweglichkeit hat und sowohl an der ulnaren, wie radialen Abduction theilnimmt, während das Radiocarpalgelenk fast ausschliesslich an der ulnaren Abduction theilnimmt, so dass die Verschiebung des Lunatum gegen den Radius bei der radialen Abduction fast = 0 ist (4).

Das Maass, mit welchem jedes der beiden Handgelenke an den Bewegungen betheiligt sei, giebt Virchow dadurch an, dass er in

Millimetern sowohl die Verschiebungen zwischen den Carpalknochen unter einander, wie den Abstand zwischen den Unterarmknochen und dem Metacarpus angiebt (3).

Neben der Hauptbewegung zur ulnaren und radialen Seite beschreibt Virchow zwei Mitbewegungen, die bei einer Abduction zwangsmässig eintreten und welche aus der Mechanik der Gelenke erklärt werden müssen. Es sind dies eine flexorische Bewegung in dem proximalen Gelenke und eine „supinatorische Biegung" der Knochen des radialen Carpalrandes. „Ob auch die distale Reihe eine flexorische Mitbewegung ausführt oder nicht, ist nicht ganz sicher zu enscheiden". „Jedenfalls darf man sagen, falls eine derartige Bewegung vorliegt, so ist sie ganz unbedeutend und an Ausdehnung mit der Bewegung im proximalen Gelenk nicht zu vergleichen".[1] (5: S. 469 und 470.)

Ueber Virchow's Beobachtungen betreffs der Stellungsänderungen der einzelnen Knochen erlaube ich mir, seine Zusammenfassung (5: S. 479 und 480) zu citiren.

Ulnare Abduction. „Das Metacarpale V und IV werden gegen das Hamatum angepresst, hierdurch der Spalt zwischen Metacarpale V und Hamatum auch an der ulnaren Seite geschlossen. Das Hamatum, gegen das Triquetrum gedrückt, gleitet an demselben, und der vorher an der ulnaren Seite klaffende Spalt zwischen beiden kommt auf diese Weise zum Verschluss. Da aber die Fläche auf dem Hamatum schraubenförmig gestaltet ist, so wird gleichzeitig dem Triquetrum eine drehende Bewegung im Sinne der Dorsalflexion aufgezwungen."

„Das mit der Mittelhand und dem Hamatum fest verbundene Capitatum wird gegen das Lunatum und Naviculare angestemmt, jedoch durch den Widerstand dieser Knochen gehindert, eine wesentliche seitliche Bewegung auszuführen". (Verschiebung = 3 ^{mm}. 4).

„Durch den Widerstand des Capitatum wird der radiale Abschnitt der Mittelhand in distaler Richtung abgehebelt[2] und die Multangula in gleicher Richtung verzogen. Da aber diese Knochen mit der volaren Kante und mit der Tuberositas des Naviculare fest verbunden sind, so wird das letztere gezwungen, dieser Bewegung zu folgen und eine drehende Bewegung im Sinne der Dorsalflexion auszuführen. (22·5°. 4.) Das Lunatum, zwischen Triquetrum und Naviculare eingeschaltet und mit beiden fest verbunden, macht die dorsal-flexorische Bewegung mit."

Radiale Abduction. „Die mit der Mittelhand fest verbundenen

[1] Von mir hervorgehoben.
[2] Von mir hervorgehoben.



Multangula werden gegen das Naviculare angedrückt und dieses nicht nur zu einer Verschiebung am Radius, sondern gleichzeitig auch zu einer Drehung im Sinne der Volarflexion gezwungen". (22·5°. 4.)

„Das mit der Mittelhand fest verbundene Capitatum erleidet durch die abductorische Bewegung der ersteren eine Stellungsänderung, wodurch der Kopf desselben am Lunatum ulnarwärts vergleitet." (7 mm. 4.)

„Das Hamatum ist gezwungen, dieser Bewegung zu folgen und schiebt sich am Triquetrum ulnarwärts, wobei es den Contact mit dem Lunatum gänzlich aufgiebt und die ganze ulnare Hälfte seiner proximalen Gelenkfläche entblösst. Am Triquetrum erzeugt das Gleiten auf der schraubenförmigen Fläche des Hamatum eine drehende Bewegung im Sinne der Volarflexion und die immerhin feste Verbindung mit dem Capitatum und dem Hamatum ein Vergleiten am Lunatum in distaler Richtung. Das Lunatum, an Naviculare und Triquetrum befestigt, macht die Volarflexion mit".

Beim Uebergehen von radialer zu ulnarer Abduction „schiebt sich das Bild des Multangulum minus theilweise über das des Capitatum; das des Multangulum majus schiebt sich stärker als vorher über das des Minus und greift sogar auf das Capitatum über" — auch das Kahnbein betheiligt sich an dieser Bewegung —; „es wird sich darum handeln, zu entscheiden, ob dies eine Bewegung der Multangula ist, welcher das Kahnbein folgen muss, oder eine Bewegung des Kahnbeins, welcher die Multangula folgen müssen. Das letztere ist wohl das Wahrscheinlichere".

Die Untersuchung von A. Bühler (6) ergab, im Widerspruche zu den beiden anderen Forschern, dass eine Bewegung im Radiocarpalgelenk als Ganzem im Sinne einer Seitenverschiebung, wenn überhaupt, nur in geringem Maasse stattfinde und für die Handbewegungen als solche bei radialer und ulnarer Adduction von untergeordneter Bedeutung sei. Die Bewegungen in radio-ulnarer Ebene vollziehen sich der Hauptsache nach in der Articulatio intercarpea.

Er hat keine supinatorischen Mitbewegungen der distalen Carpalreihe im Sinne Virchow's erwähnt, obgleich seine Bilder eine solche simuliren können, und zwar in umgekehrter Art, als sie dieser Forscher geschildert hat, indem hier mit ulnarer Abduction eine suppinatorische, mit radialer Abduction eine pronatorische Biegung verbunden zu sein scheint.

Die flexorischen Mitbewegungen des Naviculare hat er beschrieben, desgleichen eine Verschiebung des Triquetrum in volarer Richtung bei ulnarer, in dorsaler Richtung bei radialer Abduction.

Der ulnare Endpunkt des Naviculare wie der radiale Endpunkt des Lunatum sollen sich nicht gegen den Radius verschieben. Das Lunatum im Ganzen soll keine Seitenbewegung gegen den Radius ausführen, sondern sich nur um die Längsaxe drehen. Seine Bilder zeigen auch bei ulnarer Abduction ein schmales Bild des Lunatum, dessen ulnare Kante nicht ausser den Radius ragt; bei radialer Abduction wird das Bild des Lunatum beinahe um das Doppelte breiter, dadurch, dass die ulnare Kante ausser den Radius gerückt ist, die radiale Kante dagegen fest stehen zu bleiben scheint. — Die Form des Beines ist auch sehr verändert. Eine geringe Verschiebung des Lunatum und Triquetrum bei ulnarer Abduction „geschieht nur, um dem ulnaren Theil der zweiten Carpalreihe Platz zu machen."

Eigene Beobachtungen.

Bei der Wahl des Materials zum Studium der Abductionsbewegungen der Hand habe ich versucht, zur Röntgographirung solche Personen zu erhalten, deren Hände sich durch verschiedene Arbeitsarten in verschiedenen Richtungen ausgebildet haben. Es ist mir gelungen, als Repräsentantin für eine durch specielle Uebung äusserst bewegliche Hand die rechte Hand einer Pianistin (32 Jahre), radiographiren zu dürfen. Den entgegengesetzten Typus — ein Handgelenk, das durch kunstlose, schwere Arbeit grosse Festigkeit erhalten hat, aber nur geringe Beweglichkeit besitzt — habe ich bei einem äusserst grobgliedrigen Steinarbeiter (21 Jahre) gefunden. Ausserdem habe ich Radiographien von zwei 24jährigen Medicinern aufgenommen, von denen wir annehmen können, dass sie Handwurzeln mit normaler Beweglichkeit haben. Endlich habe ich auch die Hand eines 10jährigen Knaben röntgographirt.

Es wäre von grossem Interesse gewesen, eine Anzahl Repräsentanten für ungleiche Beschäftigungen zu erhalten, theils aber stösst dies auf Schwierigkeiten, Personen zu finden, welche geneigt sind, sich der recht beschwerlichen Anordnung bei der Röntgographirung zu unterwerfen, theils ist die Bearbeitung jedes Falles eine so zeitraubende Arbeit, dass meine Zeit es nicht erlaubte, ein grösseres Material zu untersuchen als das vorliegende.

1. Projection der Axe der Abductionsbewegungen in dem Radiocarpal- und dem Intercarpalgelenke.

Bei Vergleich zwischen den durchgepausten Röntgogrammen von den Flächenansichten der Abductionsstellungen ist es ein Umstand,

welcher bald in die Augen fällt. Das Capitatum und das mit demselben fest verbundene Metacarpale III haben während aller Pausen der Bewegung so gleiche Projectionen gegeben, dass ihre Contouren, obwohl nicht exact congruent, doch mit so kleinen Abweichungen zusammenfallen, dass es möglich ist, die Bilder von diesen Knochen auf den verschiedenen Radiogrammen[1] genau über einander einzupassen. Auch der Radius hat zu Folge der Anordnung bei der Röntgographirung während der Bewegungsreihe gleiche Projectionen gegeben.

Diese beiden Umstände geben uns ein werthvolles Mittel, die Gesetze für die Abductionsbewegungen des Handgelenkes kennen zu lernen.

Hier liegt nämlich ein doppeltes Gelenk vor, welches seinem Haupttypus nach von demselben Bau ist wie das in Abschn. II behandelte Gelenksystem. Weil das proximale Gelenksegment, der Radius, fixirt gewesen ist und darum dasselbe Bild gegeben hat, können wir durch Einpassen der durchgepausten Bilder über ein Bild in der Reihe, so dass die Contouren des Radius auf den verschiedenen Röntgogrammen einander decken, auf einem Bilde Projectionen von den beiden anderen Gelenksegmenten in deren Stellung zum Radius während der Bewegungspausen erhalten.

Nun hat indess auch das distale Gelenksegment, das Capitatum, im Verlauf der Bewegung correspondirende Projectionen gegeben. Das Mittelsegment, das Lunatum, hat dagegen seine Stellung zum Plane der Hauptbewegung nicht beibehalten und darum auch während des Verlaufs der Bewegung keine gleichen Projectionen gegeben. Wenn dies der Fall gewesen wäre, hätte man die Bewegung bei jedem Gelenk für sich untersuchen können. Nun muss man durch das Studium der Bewegung des Capitatum im Verhältniss zum Radius von den Gesetzen für die Bewegung des Gelenksystems Kenntniss zu erlangen suchen.

Auf ein Röntgogramm von einer Handstellung (Taf. V Fig. 1) wird eine Linie (q) einige Centimeter distal vom proximalen Ende des Capitatum aufgetragen. Ueber dieses Röntgogramm werden nun nach einander die zu derselben Reihe gehörenden Bilder eingepasst, so dass die Contouren von Capitatum und Metacarpale III auf den verschiedenen Bildern einander decken, und auf sämmtliche wird eine Linie mit identisch gleicher Lage zum Projectionsbild des Capitatum wie Linie q gezeichnet. Auf dem Bilde von einer Handstellung (Taf. V Fig. 2) werden nun wieder nach einander die übrigen Röntgogramme

[1] Im Folgenden nenne ich der Kürze wegen die Pauscopien der Röntgogramme auf durchscheinendem Papier nur Röntgogramme oder Radiogramme.

eingepasst, so dass die Bilder des Radius einander decken, und die Lage, welche die im Verhältniss zum Capitatum fixe Linie q zum Radius während der verschiedenen Pausen der Abductionsbewegung eingenommen hat, wird auf dieses Bild gezeichnet.

Hierdurch erhält man auf ein Bild die verschiedenen Stellungen im Verhältniss zum Radius (q_1, q_2 u. s. w.), welche eine gewisse, in ihrer Stellung zum Capitatum fixe Linie während der Bewegung eingenommen hat.

Wenn das Capitatum um eine feste Axe sich gegen den Radius bewegt hat, sollen diese Linien Tangenten von einem Kreisbogen mit der Projection dieser Axe als Mittelpunkt sein. S. Abschn. II.

Unter den Kreisen, welche alle die auf einem Bilde gezogenen Linien tangiren, wird nun der aufgesucht, dessen Mittelpunkt seine Lage zwischen den betreffenden Linien und dem distalen Gelenke hat, weil die Entfernung von der Linie q bis zum distalen Gelenke so gross gewählt worden ist, dass der Krümmungshalbmesser für die proximale Gelenkfläche des Capitatum kleiner als diese Entfernung sein muss.

Der Mittelpunkt für diesen Tangentenkreis (*tg* Taf. V Fig. 2) ist der Punkt M_2.

Dieser Punkt ist so gelegen, dass er den Mittelpunkt für die proximale Gelenkfläche und für den proximalen Theil der radialen Fläche des Capitatum zu bilden scheint, so wie diese sich auf den Röntgogrammen darstellt.

Um ferner die Eigenschaften des Punktes M_2 zu untersuchen, wird Linie 2 durch denselben gezogen. Diese Linie, welche, sofern M wirklich der Mittelpunkt für die Projection der proximalen Fläche des Capitatum auf dem Frontalplane ist, eine Normale zu dieser bildet, wird auf sämmtliche zu dieser Reihe gehörende Röntgogramme auf die Weise gezogen, dass sie so über einander eingepasst werden, dass die Contouren von Capitatum und Metacarpale III zusammenfallen. Die verschiedenen Lagen (1, 2, 3 u. s. w.) der fixen Normale zum Radius im Laufe der Bewegung werden auf ein Bild (Taf. V Fig. 3) gezeichnet, und zwar unter Einpassung der übrigen Röntgogramme über dieses Bild, so dass die Contour des Radius mit derselben Contour auf den anderen Bildern zusammenfällt.

Es zeigt sich dann, dass die Linien 1, 2, 3 u. s. w. einander in einem Punkte (M_7 Taf. V Fig. 3) schneiden.

Durch das Einpassen der auf Taf. V Figg. 2 u. 3 wiedergegebenen Radiogramme über einander, so dass die Bilder des Capitatum und Metacarpale III einander decken, findet man, dass die Punkte M_2 und M_7 zusammenfallen. Der Punkt M auf dem Capitatum wird auf

den Radiogrammen in der Serie besonders bezeichnet. Legt man nun die Radiogramme über einander, so dass die Bilder des Radius einander decken, so findet man, dass auch nun die Punkte M_1, M_2, M_3 u. s. w. zusammenfallen, d. h. dass der gefundene Punkt M auf dem Projectionsbilde des Capitatum während der ganzen Abductionsbewegung unbeweglich bleibt. Hieraus geht hervor (siehe Abschn. II), dass durch diesen Punkt die Axe für die Abductionsbewegungen im Radiocarpal- wie im Intercarpalgelenk verläuft.

Das Capitatum bewegt sich deshalb bei den Abductionsbewegungen im Verhältniss zum Radius, als ob es mit einem exacten, einfachen Gelenk direct gegen diesen Knochen rotirte.

Dass die Abductionsbewegungen im Radiocarpal- wie Intercarpalgelenk um sagittale Axen ausgeführt werden und nicht das Resultat einer Combination von Bewegungen um schiefe Axen sein können, die sich in ihrer Richtung mehr dem Frontal- als dem Sagittalplane[1] näherten, ist, wie H. Virchow betont hat, durch die grossen Verschiebungen in radio-ulnarer Richtung bewiesen, die von den Bildern der Knochen beider Reihen ausgeführt werden.

Ob die Axen der beiden Gelenke rein sagittal verlaufen, d. h. ob sie eine gemeinsame sagittale Axe haben, oder ob es zwei Axen giebt, die einen sehr kleinen Winkel mit dem Sagittalplane bilden und einander in dem gemeinsamen Rotationscentrum[2] schneiden, das ist auf den Röntgogrammen unmöglich sicher zu entscheiden. Die Hauptsache ist indess die, dass die Abductionsbewegungen in beiden Gelenken um eine fixe Axe ausgeführt werden, welche in sagittaler oder annähernd sagittaler Richtung durch ein für die beiden Gelenke gemeinsames Rotationscentrum läuft.

Die Figuren 1, 2, 3 auf Taf. V stellen Röntgogramme von Fall IV, meiner eigenen linken Hand, vor, die Rückseite nach der Platte gewendet. Die Röntgogramme, welche von Figg. 1 u. 2 Taf. V (Fall IV *b*) repräsentirt sind, wurden während einer Sitzung auf-

---

[1] Bei Besprechung der Bewegungen der Hand bezeichne ich der Kürze wegen eine Ebene, die in radio-ulnarer Richtung durch Hand und Vorderarm verlegt gedacht wird, als Frontalplan der Hand bezw. des Vorderarms, und eine gegen diesen Plan senkrechte, bei gestreckter Hand in der Längsrichtung der Hand und des Vorderarms verlaufende Ebene benenne ich Sagittalplan der Hand bezw. des Vorderarms.

[2] Den Punkt auf dem Projectionsbilde eines Knochens, welcher die Projection von der Rotationsaxe für ein gewisses Gelenk auszeichnet, nenne ich im Folgenden der Kürze wegen „Rotationscentrum".



genommen, in welcher nur diese zwei Röntgogramme aufgenommen wurden, damit nicht, während der Röntgographirung einer dazwischen liegenden Stellung, Hand oder Arm gerollt werden sollte. Die ulnare und die radiale Abduction sind nicht weiter getrieben, als dass die Bewegung ohne Anstrengung ausgeführt werden konnte, um nicht den Arm in seiner Lage zu verrücken. Diese Röntgogramme zeigen auch ausserordentlich gut übereinstimmende Bilder von sowohl den Unterarmknochen, als von dem Capitatum und Metacarpale III.

In Taf. V Fig. 4 sind die beiden Bilder der Vorderarmknochen von Taf. V Figg. 1 u. 2 über einander gezeichnet, das eine mit punktirten, das andere mit ganz ausgezogenen Contouren. Man sieht, wie der Radius und die Ulna sowohl jedes für sich fast exact gleiche Contouren gegeben hat, als sie ihre Stellung zu einander beibehalten haben! Das Capitatum und Metacarpale III haben auch auf den beiden Röntgogrammen zusammenfallende Bilder gegeben.

Das Röntgogramm, welches in Fig. 3 Taf. V wiedergegeben ist, gehört zu einer Röntgogrammreihe (Fall IV *a*) von derselben Hand wie Figg. 1 u. 2 Taf. V, aufgenommen mit denselben Röntgenanordnungen, nur dass die distale Hälfte der Mittelhand hierbei eingegipst war. Bei dieser Radiographirung wurden fünf Radiogramme von verschiedenen Pausen der Abductionsbewegung aufgenommen. Die radiale und ulnare Abduction wurden nun so weit getrieben, als sie unter Anwendung der eigenen Musculatur des Armes getrieben werden konnten, wobei eine 8° grössere ulnare Abduction und 6° grössere radiale Abduction als in Fall IV *b* erreicht wurde. In den vier radialen Stellungen gelang es, gleiche Bilder vom Radius zu erhalten und, obgleich die Hand in geringem Grade um seine Längsaxe rotirt hatte, so ähnliche Bilder vom Capitatum und Metacarpale III zu bekommen, dass analoge Punkte auf dessen Projectionsbilde in den verschiedenen Stellungen genau gekennzeichnet werden konnten. Ein gewisser Punkt (Taf. V Fig. 3) — genau entsprechend dem Punkte *M* in Fall IV *b* — auf dem Capitatum bleibt während der Abductionsbewegung unverändert im Verhältniss zu den Projectionsbildern von sowohl dem Capitatum als dem Radius.

Auf dem Röntgogramme der extremen ulnaren Abductionsstellung im Falle IV *a* haben der Radius und das Capitatum Bilder gegeben, welche von den Bildern dieser Knochen auf den übrigen Röntgogrammen in derselben Serie sehr unbedeutend abweichen, aber ein auf dem Projectionsbilde des Capitatum mit dem Punkte *M* auf den übrigen Röntgogrammen analog belegener Punkt ist um etwa 1 ^{mm} in radiodistaler Richtung von der Lage verschoben, die er auf den übrigen

Röntgogrammen in der Serie zum Radius einnimmt. Dies könnte darauf deuten, dass während der letzten 8° der ulnaren Abduction beide oder eines von den Carpalgelenken die Axe seiner Bewegung geändert haben.

Indess hat die Hand beim Uebergange zur extremen ulnaren Abductionsstellung in recht hohem Grade in pronatorischer Richtung rotirt, was sich durch Contourveränderungen in den Randpartien der beiden Carpalreihen zu erkennen giebt. Dadurch dürfte auch das Projectionsbild des Capitatum verschoben worden sein.

In Fall II *a*, wo während der letzten 18° der ulnaren Abduction 12° der Bewegung im Radiocarpalgelenke ausgeführt worden sind, haben das Capitatum und die Vorderarmknochen dieselbe Contour bewahrt und das Capitatum sich um eine feste Axe bewegt. Ebenso verhält es sich in Fall I, bei welchem während der letzten 16° der ulnaren Abduction 7° der Bewegung im Radiocarpalgelenk ausgeführt worden sind, und in Fall III, wo während einer ulnaren Abduction von 21° eine Excursion von 9° im Radiocarpalgelenke erfolgt ist.

Auch während extremer ulnarer Abduction mit grosser Excursion im Radiocarpalgelenke haben sich beide Gelenke in diesen Fällen um ein festes Rotationscentrum bewegt. Die in Fall IV *a* während der letzten 8° der ulnaren Abduction auf dem Röntgogramme hervortretende Veränderung der Lage für die Axe des Radiocarpalgelenkes bei der Abductionsbewegung leitet sich deshalb wahrscheinlich von einer durch Rollung der Hand hervorgerufenen Verschiebung des Projectionsbildes des Capitatum her. Die Möglichkeit ist doch nicht ausgeschlossen, dass die Hand bei besonders forcirter Abduction dazu gebracht werden kann, in beiden oder einem der Gelenke um neue Axen zu rotiren.

Obgleich die geniale Henke'sche Theorie von zwei schrägen Axen, um welche durch Combinationen sowohl Flexions- als Abductionsbewegungen ausgeführt werden, in der Litteratur die am allgemeinsten angenommene ist, so existirt doch eine Untersuchung, die, bevor noch die Röntgenstrahlen Aufklärung gaben, es wahrscheinlich macht, dass die Abductionsbewegungen in beiden Gelenken um eine durch das Capitulum Capitati laufende sagittale Axe ausgeführt werden. In ihren bewundernswerthen „Untersuchungen über die Gelenke des menschlichen Armes“ berichten nämlich W. Braune und O. Fischer über eine Versuchsreihe, wobei bei einem Vorderarm, dessen Radius so fixirt war, dass die Handfläche eine horizontale Lage erhielt, nach Freipräpariren der Kapsel dünne Holzstifte, an denen ein sehr dünner

Draht befestigt wurde, einer in das Lunatum, ein zweiter in das Capitatum mit gewissen Cautelen eingetrieben wurden. Die Projectionen der Spitze der Drähte auf die Horizontalebene wurden während der Bewegung registrirt.

„Die Spitzen dieser beiden Drähte beschreiben während der Radial-Ulnarflexion in ihren Projectionen auf die Horizontalebene je einen Kreisbogen[1], dessen Mittelpunkt im Innern des Köpfchens des Capitatum liegt" (8: S. 126).

Durch die von mir gemachte Röntgenuntersuchung wird, wie gezeigt, die Richtigkeit dieser Beobachtungen vollständig bestätigt und ein Zeugniss abgelegt, mit welchem ausserordentlichen Geschick diese schwierige Untersuchung ausgeführt worden sein muss.

2. Bestimmung der Betheiligung des Radiocarpal- und des Intercarpalgelenkes an den Abductionsbewegungen.

Der Nachweis auf den Röntgogrammen von dem Rotationscentrum für das Radiocarpal- und das Intercarpalgelenk bei den Abductionsbewegungen ist nicht nur durch den Einblick in den Mechanismus des Handgelenkes, der dadurch gewonnen wird, von Bedeutung. Dadurch wird auch ermöglicht, auf den Röntgogrammen die Excursionen der Gelenke in Graden eines Kreisbogens zu messen und so einen für alle Fälle vergleichbaren Ausdruck für die Theilnahme der beiden Gelenke an der Bewegung des Gelenksystems zu erhalten.

Bei dieser Messung bin ich in folgender Weise vorgegangen. Der Ausschlag der Excursionen des ganzen Handgelenkes zwischen jeder Pause in der Bewegung wird durch Messen der Abweichungen zwischen den, wie oben beschrieben, auf ein Bild gezeichneten Stellungen (1, 2, 3 u. s. w. Taf. V Fig. 3) bestimmt, die eine in ihrer Lage zum Capitatum bestimmte Normale zu seiner proximalen Gelenkfläche während des Laufes der Bewegung im Verhältniss zum Radius eingenommen hat.

Um die Bewegung des Intercarpalgelenkes zu bestimmen, wird über eines der Röntgogramme von den übrigen zur Reihe gehörenden Röntgogrammen das eine nach dem anderen eingepasst, so dass die ulnaren und radialen Contouren des Körpers des Lunatum und der distale Theil der nach dem Lunatum gekehrten Contour des Naviculare auf dem einen Bilde mit den entsprechenden Contouren auf dem anderen Bilde zusammen fallen, wobei auch zu gleicher Zeit die

[1] Von mir hervorgehoben.



Rotationscentren (M_1, M_2 u. s. w.) zusammenfallen (Taf. V Fig. 7). Die genannten Orientirungsstellen sind zur Einstellung der Bilder der proximalen Carpalreihe über einander gewählt worden, weil das Projectionsbild des Lunatumkörpers, obgleich dessen proximale Contour durch die Dorso-Volarflexionen geändert wird, wenn die Hand nicht gedreht wird, seine Breite beibehält. Durch die bei der Einpassung auf das Naviculare genommene Rücksicht wird die Messung sicherer gemacht.

Die durch das Rotationscentrum auf dem in Taf. V Fig. 1 wiedergegebenen Röntgogramme laufende Linie 1 nimmt im Verhältniss zur proximalen Carpalreihe die Lage I ein. Auf sämmtliche Bilder derselben Reihe werden nun die im Verhältniss zur proximalen Carpalreihe der Serie der Linie I analog gelegenen Linien II (Taf. V Fig. 2) und VII (Taf. V Fig. 3) u. s. w. gezogen.

Die Abweichungen zwischen diesen Linien und die im Verhältniss zum Capitatum fixen Linien 1, 2, 3 u. s. w. geben nun direct die Excursionen in dem Frontalplane an, die im Intercarpalgelenke während der Bewegung zwischen den Handstellungen 1 und 2, 1 und 3, 1 und 4 u. s. w. ausgeführt worden sind, denn die im Verhältniss zur proximalen Carpalreihe fixe Linie ist so verlegt, dass sie bei der Handstellung 1 mit der in ihrer Lage zum Capitatum fixen Linie zusammenfällt.

Die Excursionen im Radiocarpalgelenke werden dadurch gemessen, dass die Bilder des Radius über einander placirt werden — wobei auch die Rotationscentren zusammenfallen — und die Abweichungen zwischen den Lagen (I und II Taf. V Fig. 4), die eine im Verhältniss zur proximalen Carpalreihe (Lunatum) fixe Linie in den verschiedenen Handstellungen zum Radius einnimmt, gemessen werden.

Die in den verschiedenen Röntgogrammen derselben Serie auf den Bildern des Capitatum und des Lunatum analog gelegten Linien können als Projectionen derjenigen Punkte des Capitatum wie des Lunatum betrachtet werden, die in einem gegebenen, durch die Rotationsaxe laufenden, senkrecht zur Projectionsebene stehenden Plane sich befinden, der folglich nicht während der Bewegung seine Neigung gegen die Projectionsebene ändert. Da die Antikathode in der Verlängerung der Rotationsaxe oder in deren nächster Nähe auf ziemlich grossen Abstand (40 ^{cm}) von der Platte eingestellt worden ist, kann man, ohne einen erwähnenswerthen Fehler zu begehen, behaupten, dass die Stellungsänderungen der auf den Bildern des Capitatum und des Lunatum gelegten Messlinien die Drehungen angeben, welche von den durch dieselben gelegten Ebenen ausgeführt werden, die durch die Bewegungs-

axe laufen, also senkrecht zur Bewegungsebene bleiben. Die Drehungen dieser Ebenen gerade geben von den seitlichen Bewegungen der ganzen betreffenden Knochen Aufschluss. Wenn das Capitatum und das Lunatum in derselben Serie exact congruente Contouren geliefert hätten, dann wären die gefundenen Zahlen absolut exact. Dies ist jedoch nicht der Fall. Die Bilder der genannten Knochen sind indess, wie ich dargethan habe, einander so gleich, dass man die gemessenen Winkel für sehr gute Annäherungswerthe von dem Grade der Bewegungen zu halten berechtigt ist.

Durch diese Messungen erhält man theils die totale Bewegung des Gelenksystems zwischen jeder Pause, theils die Excursion in dem Radiocarpal- und Intercarpalgelenke während desselben Abschnittes der Bewegung. Die Summe der Ausschläge beider Gelenke muss dann, wenn die Messung richtig ausgeführt ist und beide Gelenke wirklich um das gefundene Rotationscentrum rotiren, gleich der Bewegung des ganzen Gelenksystems sein. Dies ist auch der Fall, indem für alle Fälle die Summe der Excursionen in beiden Gelenken mit dem Ausschlage der Bewegung des ganzen Gelenksystems stimmt. Die Maasse für die Excursionen sind in ganzen Graden und in ganzen Procentzahlen angegeben. Das Resultat der Messungen ist in Tab. I angegeben.

Bei der Prüfung dieser Ziffern findet man, dass nicht nur die Beweglichkeit des gesammten Handgelenkes wechselt, sondern auch, dass das Verhältniss zwischen dem Beitrag des Radiocarpal- und Intercarpalgelenkes zur Bewegung für ungleiche Fälle sehr verschieden ist; ausserdem liegt das Bewegungsgebiet bei verschiedenen Individuen in verschiedenem Grade nach der ulnaren oder radialen Seite.

Diese individuellen Variationen dürften zum Theil die Meinungsverschiedenheit erklären, zu welcher die Autoren beim Röntgenstudium des Hangelenkes gekommen sind. Doch ist wohl A. Bühler's Ausschliessen der reinen seitlichen Bewegungen vom Radiocarpalgelenke grösstentheils durch irreführende Bilder des Lunatum hervorgerufen, worauf ich später noch zurückkommen will. Indessen giebt es Fälle (Fall IV und V), bei welchen das Radiocarpalgelenk verhältnissmässig geringe Beweglichkeit besitzt. Dass Zuckerkandl dem Intercarpalgelenke so geringe Beweglichkeit zuertheilt, beruht ohne Zweifel zum Theil auch auf misslungener Radiographirung, denn so ungleiche Bilder können nicht erhalten worden sein, wenn die Hand während der beiden Exponirungen ihre Neigung zur Platte und ihre Stellung zum Röntgenrohr anäherungsweise beibehalten hat.

Der von H. Virchow, dessen Röntgogramme am sorgfältigsten

aufgenommen und unter Vergleich mit den „Gefrierskeletpräparaten" am richtigsten beschrieben worden sind, geschilderte Fall scheint sich, was die Theilnahme der beiden Gelenke betrifft, meinem Fall IV zu nähern.

Bei dem Versuche zu erforschen, ob trotz der bedeutenden Variationen, welche vorkommen, eine Regelmässigkeit im Verhältniss zwischen den Excursionen des Radiocarpal- und Intercarpalgelenkes zu finden wäre, habe ich während des Studiums der Abductionsbewegungen eine solche Lage der Knochen als Ausgangspunkt gewählt, dass die Längsaxe des Capitatum (die Linien 1, 2, 3 u. s. w. Taf. V Figg. 1 bis 3) mit der Richtung einer gegebenen, auf den Radius gezeichneten Linie *a* (Taf. V Fig. 3) zusammen fällt. Von dieser Lage berechne ich bei der Analyse der verschiedenen Fälle die ulnare und radiale Abduction.

Die Linie *a* ist so gelegt, dass sie die Mittelpunkte der Breitendiameter der Speiche in gleicher Höhe mit der Mitte der Incisura ulnaris (Linie *b* Taf. V Fig. 3) und dem Breitendiameter des Radius (Linie *c* Taf. V Fig. 3) $2 \cdot 5^{cm}$ mehr proximal verbindet. Deren Lage ist so gewählt, dass diese Linie in derselben Richtung wie die Rotationsaxe des Radius gehen würde, sofern es möglich ist, dieselbe auf den kurzen Theil des Radius aufzutragen, der auf den Röntgogrammen zu sehen ist. Der Grund, weshalb ich diese Ausgangslage gewählt habe und nicht von der bei der Röntgographirung eingenommenen Streckstellung ausgegangen bin, ist darin zu suchen, dass bei den während der Röntgographirung in den verschiedenen Fällen eingenommenen Streckstellungen die Stellung der Carpalknochen im Verhältniss zum Radius nicht immer gleich ist, weshalb die von der „Streckstellung" der verschiedenen Fälle ausgeführten Bewegungen nicht analog sind. Durch die Legung eben beschriebener Linien erhält man dagegen eine Ausgangslage, welche, wenn auch nicht exact, doch für alle Fälle annähernd gleich ist, so dass man controliren kann, in wieweit die eingenommenen Streckstellungen einander entsprechen. Von dieser Ausgangslage kann auch eine mit den übrigen Fällen vergleichbare Bestimmung des Umfanges der ulnaren und radialen Abduction erfolgen, auch wenn bei der Radiographirung keine Streckstellung eingenommen worden ist.

Die während der Radiographirung eingenommenen Stellungen nenne ich, ausgehend von der Ulnarabduction, mit deren Nummer in der Serie.

Die gewählte Ausgangslage weicht in den Fällen II *b* und III nur 2° nach der radialen Seite von der Streckstellung ab.

In Fall IV ist die Abweichung von der Streckstellung (Stellung 4) 4° auch nach der radialen Seite. In diesen Fällen sind die Abweichungen zwischen den betreffenden Streckstellungen und der gewählten Ausgangslage so gering, dass die auf derselben Seite von der Streckstellung ausgeführten Bewegungen für analog und charakterisirend für die ulnare und radiale Abduction gehalten werden können. In Fall V ist die Abweichung von der Streckstellung (= Stellung 3) 5° nach der ulnaren Richtung, die Stellung 2 entspricht aber auf ungefähr 1° der gewählten Ausgangslage. In den Fällen II *a* wie I *a* und *b* giebt es keine Stellung, die sich weniger als 12° von der gewählten Ausgangslage befindet, weshalb die Bilder hier nur über das Verhalten der Gelenke während geringerer Momente der Bewegung und über das Maass, in welchem die beiden Gelenke an der ganzen Bewegung theilnehmen, Aufklärung geben.

Wie durch einen Vergleich der Figg. 1 und 2 mit Fig. 3 Taf. V hervorgeht, haben durch die Gleichförmigkeit in der Röntgenanordnung die Vorderarmknochen in Fall IV *a* nahezu dieselben Bilder wie in Fall IV *b* gegeben. Auch die Bilder des Capitatum und Metacarpale III und des Lunatum sind in den beiden Serien so übereinstimmend — bei Einstellung der Bilder des Capitatum und Metacarpale III auf den Röntgogrammen aus den beiden Serien über einander fallen die Punkte *M* zusammen — dass ich bei der Berechnung der Excursionen in den beiden Carpalgelenken bei Fall IV beide Serien zu einer habe zusammenschlagen können. Das Röntgogramm 1 (Taf. V Fig. 1) in Fall IV *b* ist hierbei als Röntgogramm 2 und Röntgogramm 2 (Taf. V Fig. 2) in demselben Falle als Röntgogramm 6 in der Serie Radiogramme bezeichnet, die durch Anwendung beider Fälle erhalten wird (= Fall IV in Tab. I).

In Fall V ist die Abduction in ulnarer Richtung nicht so weit als möglich ausgeführt worden, weil in der äussersten ulnaren Abductionsstellung Zittern eintrat, welches die Radiographirung unmöglich machte.

In den Serien I *b* und II *b* hat in Folge Rollung des Armes der Radius nicht gleiche Bilder gegeben. Das Rotationscentrum ist hier mit Hülfe von Serie I *a* und II *a* und der Curvatur der proximalen Gelenkfläche am Capitatum eingelegt worden. Nur für das Intercarpalgelenk haben in diesen Fällen die Excursionen selbständig annäherungsweise genau bestimmt werden können.

Die Theilnahme des Radiocarpalgelenkes an der Bewegung ist in diesen Fällen durch Subtraction des Ausschlages des Intercarpalgelenkes vom Ausschlage des ganzen Gelenksystems während desselben Theiles

der Bewegung gemessen worden. Die Uebereinstimmung im Endresultat der Messung, welche die Fälle I *b* und II *b* mit I *a* und II *a* zeigen, sprechen dafür, dass auch die Messung der ersteren richtig ausgeführt worden ist.

In der Tabelle sind die Fälle nach dem Grade der Theilnahme der beiden Gelenke an der Bewegung geordnet, so dass Fall I das Handgelenk repräsentirt, wo das Radiocarpalgelenk (= Gelenk I) im höchsten Grade an der Bewegung Theil nimmt, und die übrigen Fälle sind nach abnehmender Bewegung in Gelenk I eingeordnet, so dass in Fall V das Verhältniss zwischen der Bewegung des Radiocarpal- und Intercarpalgelenkes (= Gelenk II) am kleinsten ist.

Das Verhältniss zwischen der Theilnahme des Radiocarpal- und Intercarpalgelenkes an den Abductionsbewegungen der Hand scheint nicht mit der Grösse der Bewegung der ganzen Hand in Verbindung zu stehen, da bei Handgelenken, welche ungefähr ebenso grosse Bewegungen ausgeführt haben, z. B. Fall I (58°) und Fall IV (58°) wie Fall II (45°) und III (36°), das Verhältniss zwischen den Ausschlägen des Radiocarpal- und Intercarpalgelenkes ganz verschieden ist: Fall I 1:1, Fall IV 1:3, Fall II 1:1 und Fall III 1:2.

Dagegen scheint das Verhältniss zwischen der Theilnahme der beiden Gelenke an der Bewegung davon abhängig zu sein, ob das Gebiet für die Bewegung mehr nach der ulnaren oder der radialen Seite liegt. Dies wieder findet seine Erklärung darin, dass jedes Gelenk bei ulnarer und radialer Abduction in verschiedenem Grade in Anspruch genommen wird.

Prüfen wir zunächst die Theilnahme des Radiocarpal- und Intercarpalgelenkes an der Abductionsbewegung nach der ulnaren Seite, so zeigen:

Fall II *b* Gelenk I 17°, Gelenk II 15°,
Fall IV Gelenk I 12°, Gelenk II 11°.

In diesen beiden Fällen, wo eine verhältnissmässig grosse Bewegung in ulnarer Richtung ausgeführt worden ist, ist also der Ausschlag des Radiocarpalgelenkes unbedeutend grösser als der des Intercarpalgelenkes.

In Fall III, wo die ganze ulnare Abduction 21° (19°) ist, nimmt Gelenk I mit 9°, Gelenk II mit 12° Theil, und in Fall V, wo nur eine 6° (5°) grosse ulnare Abduction ausgeführt ist, ist der Ausschlag des Gelenkes I 2° und des Gelenkes II 4°. —

In diesen Fällen, wo in ulnarer Richtung eine kleinere Bewegung ausgeführt worden ist, nimmt das Intercarpalgelenk in etwas höhe-

rem Grade als das Radiocarpalgelenk an der ulnaren Abduction der Hand Theil.

Bei der ulnaren Abduction scheinen also das Radiocarpal- und Intercarpalgelenk in ungefähr demselben Grade in Anspruch genommen zu werden. Bei kleineren Bewegungen aus der Streckstellung nach der ulnaren Richtung ist die Theilnahme des Intercarpalgelenkes etwas überwiegend, bei zunehmender ulnarer Abduction aber wird das Radiocarpalgelenk in steigendem Grade in Anspruch genommen.

Ein Zeichen davon ist auch das, dass in Fall IV während einer Bewegung von 10° in ulnarer Richtung von der Streckstellung aus das Radiocarpal- und Intercarpalgelenk mit 2° bezw. 8° Theil nehmen, während dagegen während der letzten 13° der ulnaren Abduction das Radiocarpalgelenk 10° der Bewegung ausführt.

In Fall II *a*, wo die ulnare Abduction 34° ist, macht Gelenk I während der letzten 18° der ulnaren Abduction doppelt so grosse Excursionen (12°) wie Gelenk II (6°), während in demselben Handgelenk (Fall II *b*) Gelenk I an 32° ulnarer Abduction mit 17°, Gelenk II mit 15° Theil nimmt. Gelenk I hat also während der ersten 14° der ulnaren Abduction eine kleinere Excursion (5°) gemacht als Gelenk II (9°).

Auch in Fall I ist die Bewegung des Radiocarpalgelenkes bei der ulnaren Abduction überwiegend, da während einer Bewegung von 46°, wovon 34° auf die ulnare Seite der Ausgangslage fallen, 24° der Bewegung in Gelenk I, 22° in Gelenk II ausgeführt werden; im Gegensatz aber zu dem, wie es sich in den übrigen Fällen verhält, hat hier Gelenk II während der letzten 16° der ulnaren Abduction ein unbedeutendes Uebergewicht, da in diesem Gelenke dann eine Bewegung von 9° ausgeführt wird.

An radialer Abduction nimmt das Radiocarpalgelenk in den Fällen II und V mit 4° Theil, während Gelenk II mit 9° bezw. 30° beiträgt. In Fall III ist bei der radialen Abduction die Excursion im Gelenk II 13°, im Gelenk I 2°. Während der ersten 17° der radialen Abduction trägt in Fall IV Gelenk II mit 15°, Gelenk I mit 2° bei; die darauf folgende Bewegung von 18° wird nur im Intercarpalgelenke ausgeführt. In Fall V erfolgt während der ersten 16° ein Excursion in Gelenk II von 14°, in Gelenk I von 2°, während der darauf folgenden 18° ist der Ausschlag in Gelenk II 16°, in Gelenk I 2°. — In Fall I, wo die ganze radiale Abduction 24° beträgt, werden von den letzten 12° 8° in Gelenk II und 4° in Gelenk I ausgeführt.

An der radialen Abduction betheiligen sich also beide Gelenke, das Intercarpalgelenk aber wird vorwiegend in Anspruch genommen,

so dass $^3/_4$ bis mehr als $^9/_{10}$ der Bewegung in diesem Gelenke ausgeführt werden. Mit zunehmender radialer Abduction scheint das Radiocarpalgelenk in immer geringerem Grade an der Bewegung Theil zu nehmen.

Da nun bei ulnarer Abduction die Betheiligung des Radiocarpal- und Intercarpalgelenkes an der Bewegung ungefähr gleich gross ist, bei radialer Abduction aber das Intercarpalgelenk in vorwiegendem Grade in Anspruch genommen wird, so muss das Verhältniss der Betheiligung beider Gelenke an der ganzen Abductionsbewegung davon abhängig sein, ob das Bewegungsgebiet mehr nach der ulnaren oder radialen Seite liegt. Wenn man in den verschiedenen Fällen den Zusammenhang zwischen der Lage des Bewegungsgebietes und der Betheiligung des Radiocarpalgelenkes an der Bewegung prüft, so zeigt es sich, dass in Fall II *a*, wo 75 Procent der Abductionsbewegung auf der ulnaren Seite der Ausgangslage liegen, das Radiocarpalgelenk 49 Procent der Bewegung ausführt. In Fall II *b*, wo 67 Procent der Bewegung auf die ulnare Seite von der Ausgangslage fallen, führt Gelenk I 47 Procent der Bewegung aus. In Fall III, wo 53 Procent des Bewegungsgebietes ulnar von der Ausgangslage fallen, kommen 31 Procent des Ausschlages auf Gelenk I. In Fall IV, wo 47 Procent der Bewegung ulnare Abduction sind, trägt Gelenk I mit 24 Procent von der Bewegung bei. In Fall V, wo nur 13 Procent der Bewegung nach der ulnaren Seite ausgeführt sind, ist die ganze Excursion des Radiocarpalgelenkes nur 15 Procent des Ausschlages des ganzen Handgelenkes.

In Fall I beträgt die ulnare Abduction 60 Procent der ganzen Bewegung, und das Radiocarpalgelenk führt die Hälfte der ganzen Excursion des Handgelenkes aus. Hier ist also das Verhältniss zwischen der Betheiligung der beiden Gelenke ungefähr dasselbe wie in Fall II, das Verhältniss zwischen ulnarer und radialer Abduction aber ist kleiner als in diesem Falle. Diese Abweichung beruht darauf, dass in Fall I Gelenk I in höherem Grade als in den übrigen Fällen an der radialen Abduction Theil nimmt. Die Erklärung hierzu liegt möglicher Weise in einer durch besondere Uebung erlangten höheren Beweglichkeit im Radiocarpalgelenke.

In Fall V scheint bei einer Bewegung von 6° zwischen den Stellungen 2 und 3 eine Excursion von 8° in Gelenk II erfolgt zu sein, während in Gelenk I eine Verschiebung von 2° nach entgegengesetzter Richtung stattgefunden hat. Diese Erscheinung dürfte durch die in diesem Falle eintretende Rotation innerhalb der proximalen Reihe hervorgerufen worden sein, welche eine irreführende Projection der Seitencontouren verursacht hat. Siehe S. 200!

Als allgemeine Regel bei den ulnaren und radialen Abductionsbewegungen tritt hervor, dass die ulnare Abduction in ungefähr gleichem Grade im Radiocarpal- und Intercarpalgelenk ausgeführt wird, doch so, dass das Verhältniss zwischen den Excursionen des Radiocarpal- und Intercarpalgelenkes bei zunehmender ulnarer Abduction etwas steigt, bei der Abnahme der ulnaren Abduction etwas sinkt.

Bei radialer Abduction wird der grössere Theil der Bewegung im Intercarpalgelenke ausgeführt, und bei zunehmender radialer Abduction nimmt das Radiocarpalgelenk in immer geringerem Grade an der Bewegung Theil.

Das Verhältniss zwischen der Betheiligung des Radiocarpal- und Intercarpalgelenkes an der ganzen Abductionsbewegung oder eines gewissen Momentes derselben ist also davon abhängig, in welchem Grade das Gebiet für die Bewegung nach der ulnaren oder radialen Seite liegt.

W. Braune und O. Fischer (8) haben an Leichen die Betheiligung des Radiocarpal- und Intercarpalgelenkes an den Abductionsbewegungen durch Messung der Projection der Curven bestimmt, welche die Spitze eines mit dem Metacarpale III verbundenen Stiftes theils bei intactem Gelenk, theils nach Ausschliessung des Gelenkes I durch Fixirung des Lunatum gemacht hat, wie auch der Projection der Curven, welche ein mit dem Radius verbundener Stift bei Abductionsbewegungen in Gelenk I nach Fxirung des Lunatum gezeichnet hat. Sie haben als Ausgangslage die Stellung der Hand gewählt, von welcher die Bewegung nach der ulnaren und radialen Seite gleich gross ist. Die gemessene Bewegung ist nicht in der Frontalebene des Vorderarmes, sondern in der Ebene der grössten seitlichen Bewegung ausgeführt. Da durch den Eingriff in das Gelenk die Beweglichkeit in demselben zugenommen hat, stimmt die Summe der Bewegung der beiden Gelenke nicht mit der von dem ganzen intacten Handgelenke ausgeführten Bewegung.

Der Ausschlag der Bewegung des ganzen Gelenkes war 54°, also 27° ulnare und 27° radiale Abduction. Bei ulnarer Abduction zeigte Gelenk I einen Ausschlag von 19° und Gelenk II einen solchen von 16°. Bei radialer Abduction war die Betheiligung des Gelenkes I 13° und des Gelenkes II 23° (8: S. 149).

Diese Zahlen können nicht direct mit den von mir gefundenen verglichen werden, da die Ausgangslage nicht dieselbe ist, das Resultat aber stimmt ja in der Hauptsache mit dem von mir gefundenen überein: bei einer hochgradigen ulnaren Abduction ist die Bewegung des

Radiocarpalgelenkes etwas vorwiegend; die radiale Abduction wird grösstentheils im Intercarpalgelenk ausgeführt.

3. Bewegungen zwischen den Knochen in den Carpalreihen und die dorso-volarflexorische Mitbewegung der proximalen Carpalreihe bei Abductionsbewegungen der Hand.

Wie aus dem Bericht über meine Anordnung bei der Röntgographirung hervorgeht, habe ich versucht, während der Abductionsbewegung die rollende und dorsal- oder volarflectirende Wirkung der abducirenden Muskeln auf die ganze Hand auszuschliessen, um Bilder von einer reinen Abductionsbewegung in der Frontalebene des Vorderarmes zu erhalten. Die Radiographirung ist auch so geordnet gewesen, dass die Carpalknochen, welche nur im Plane der Hauptbewegung rotirt haben, während aller Pausen der Bewegung dasselbe Projectionsbild beibehalten sollten, wogegen die Knochen, welche auch in anderen Ebenen rotirt haben, dies durch Veränderungen in ihrem Projectionsbilde zu erkennen geben mussten, aus denen man die Art der Bewegung beurtheilen konnte.

Es gilt nun zu untersuchen, in welchem Grade das gewünschte Resultat erreicht worden ist, und in den Fällen, wo es nicht gelungen ist, die Untersuchungsmethode ganz durchzuführen, bei der Bestimmung der Stellungsveränderungen der Knochen die entstandenen Fehler zu berücksichtigen.

Die distale Carpalreihe.

Eine Stellungsveränderung zwischen dem Capitatum und Metacarpale III ist auf keinem Röntgogramme während der Abductionsbewegung der Hand beobachtet worden. Eine seitliche Bewegung zwischen diesen Knochen dürfte also nicht vorkommen, sondern es verhalten sich das Capitatum und Metacarpale III, wenigstens bei nicht forcirten Seitenbewegungen der Hand, als ob sie einen einzigen Knochen bildeten.

Wenn nun die Mittelhand bewogen worden ist, sich nur in einer zur Photographieplatte parallelen Ebene zu bewegen, dann wird auch das Bild des Capitatum wie das des Metacarpale III in Folge der beobachteten Röntgenanordnung auf den verschiedenen Bildern derselben Serie dasselbe Projectionsbild zeigen.

Betrachten wir die Taf. V Figg. 1 und 2, so sind auch hier die Projectionen des Capitatum und Metacarpale III auf dem Bilde der ulnaren Abductionsstellung der Hand und auf dem Bilde der radialen Abductionsstellung nahezu exact congruent, was dann zeigt,

dass das Capitatum eine reine Abductionsbewegung ausgeführt hat und dass die Röntgenanordnung glücklich durchgeführt worden ist.

Die Bilder des Hamatum sind auch in beiden Stellungen congruent, so dass die Contouren des Hamatum und Capitatum in beiden Stellungen zusammenfallen. Die Metacarpalien II bis V sind ebenfalls zum Capitatum und Hamatum in derselben Stellung verblieben.

Fall II zeigt auch in allen Stellungen zusammenfallende Bilder des Capitatum und Hamatum wie der Metacarpalien II bis IV. Das Metacarpale V hat bei der Bewegung der Hand von ulnarer zu radialer Abduction eine geringe radiale Biegung gegen das Hamatum ausgeführt.

In Fall V sind auch die Bilder des Capitatum und Metacarpale III gleich. Auch das Hamatum giebt gleiche Bilder, es hat sich aber während der Bewegung von ulnarer zu radialer Abduction allmählich in proximaler Richtung gegen das Capitatum verschoben. so dass sich sowohl dessen obere wie untere Contour 1·5 ^{mm} im Verhältniss zum Capitatum verschoben hat. Das Metacarpale II ist in derselben Stellung zum Capitatum verblieben. Die Metacarpalien IV und V sind der Bewegung des Hamatum gefolgt, und ausserdem hat sich das Metacarpale V während der ulnaren Abduction der Hand im Verhältniss zum Hamatum etwas nach der ulnaren Seite gebogen.

Durch diese Röntgogramme, welche Bider einer reinen Abductionsbewegung wiedergeben, ist bewiesen, dass das Capitatum und Hamatum bei Abductionsbewegungen der Hand nur in der Ebene der von der Hand ausgeführten Bewegung rotiren. Sie rotiren dabei nicht gegen einander. Eine unbedeutende Verschiebung in proximaler Richtung kann bei Uebergang der Hand von ulnarer zu radialer Abduction vom Hamatum gegen das Capitatum doch erfolgen. Die Metacarpalien II bis IV ändern in Folge der Abductionsbewegungen nicht ihre Stellung zur distalen Carpalreihe. Das Metacarpale V führt in einigen Fällen gegen das Hamatum Seitenbewegungen in derselben Richtung wie die Abductionsbewegungen der Hand aus.

In den Fällen I, III und IV*a* hat unter gewissen Abschnitten der Abductionsbewegung eine gleichzeitige Rollung der Hand nicht vermieden werden können. Diese Rollung ist indess nicht grösser gewesen, als dass das Capitatum und Hamatum wie das Metacarpale III zum grössten Theile zusammenfallende Bilder gegeben haben und nur an kleineren Partien der Contour von einander abgewichen sind. Die

Veränderungen, welche durch die Rollung eingetreten sind, bestätigen die auf den beschriebenen Röntgogrammen gemachten Beobachtungen.

Die pro- und supinatorischen Bewegungen der Multangula. Nach den Multangula verlegt H. Virchow eine bei ulnaren Abductionsbewegungen der Hand auftretende „pronatorische Biegung", und bei radialer Abduction eine „supinatorische Biegung", welche beide in Folge des Mechanismus des Gelenkes zwangsmässig eintreten.

Hierbei ist indess der Einfluss übersehen worden, den mit Abductionsbewegungen der Hand gleichzeitige Bewegungen des Metacarpalknochens des Daumens auf das Gelenk zwischen den Multangula ausüben. Bei einer näheren Prüfung der Röntgenbilder, wo während der Abductionsbewegungen der Hand die Lage des Daumens systematisch variirt worden ist, geht mit Sicherheit hervor, dass es Bewegungen des Metacarpale I sind, welche die pro- und supinatorische Rotation zwischen den Multangula bewirken.

In Fall IV *b* ist bei ulnarer Abductionsstellung der Hand (Taf. V Fig. 1) der Metacarpalknochen des Daumens abducirt. Bei radialer Abduction der Hand (Taf. V Fig. 2) ist der Metacarpalknochen des Daumens adducirt und schwach opponirt. Auf den Röntgogrammen ist zu sehen, wie die Projection des radialen Randes des Multangulum majus auf dem letzteren Bilde in ulnarer und distaler Richtung gegen das Multangulum minus verschoben ist.

In Fall IV *a* ist bei extremer radialer Abduction der Hand (Taf. V Fig. 3) das Metacarpale I abducirt. Durch Vergleich dieses Röntgogrammes mit Taf. V Fig. 2 ist zu sehen, wie bei radialer Abductionsstellung der Hand das Multangulum majus in verschiedenem Grade nach dem Multangulum minus rotirt sein kann je nach der vom Metacarpale I ausgeführten Bewegung. Taf. V Fig. 1, verglichen mit Taf. V Fig. 2, zeigt, dass auch die ulnare Abduction der Hand nicht mit einer zwangsmässigen pronatorischen Biegung der Multangula verbunden ist.

Die betreffende Contourveränderung ist nicht durch Rotation der ganzen Hand bewirkt, denn das Capitatum-Hamatum und die Metacarpalia II bis V haben auf Taf. V Figg. 1 und 2 ihre Contour beibehalten, was in solchem Falle nicht geschehen könnte. Dieselbe Erscheinung tritt auch auf einem Röntgogramme hervor, welches unmittelbar nach der Exponirung der Handstellung, die in Taf. V Fig. 2 wiedergegeben wird — radiale Abductionsstellung — Fall IV *b* — von derselben Hand nach ausgeführter Abduction des Metacarpale I,

aber mit unveränderter Hand und unverändertem Arm aufgenommen wurde. Die übrigen Handwurzelknochen haben auf diesem Röntgogramme ihre Contour und Stellung zu einander vollständig bewahrt, die Projection des Multangulum majus aber ist in radio-proximaler Richtung im Verhältniss zum Multangulum minus verschoben, was eine Verschiebung in dorsaler und proximaler Richtung Seitens des Multangulum majus gegen das Multangulum minus zeigt.

Die auf den Röntgogrammen erscheinende Verschiebung des Projectionsbildes des Multangulum majus in ulnarer und distaler Richtung bei Uebergang des Metacarpale I von Abductions- zu Oppositionsstellung giebt Seitens des Multangulum majus eine pronatorische Biegung und eine Verschiebung in distaler Richtung bei der Opposition des Daumens an.

Vergleicht man die von H. Virchow und A. Bühler publicirten Bilder, so erhält man noch ein Beispiel von dem Einflusse, den Bewegungen des ersten Metacarpalknochens auf das Gelenk zwischen den Multangula ausüben, wie auch davon, dass nicht eine gewisse Stellung der Hand zwangsweise eine gewisse Lageänderung der Multangula zur Folge hat. H. Virchow's Röntgogramme zeigen bei ulnarer Abduction eine pronatorische Biegung, bei radialer Abduction eine supinatorische Biegung des Multangulum majus; das Metacarpale I aber ist auch bei ulnarer Abduction mehr adducirt als bei radialer Abduction. Dasselbe scheint, nach den Zeichnungen zu urtheilen, bei seinen Skeletgefrierpräparaten der Hände der Fall zu sein. Die Röntgogramme, welche A. Bühler veröffentlicht hat, zeigen dagegen, obgleich er nichts derüber sagt, eine bedeutende supinatorische Biegung des Multangulum majus bei ulnarer Abduction, und das Metacarpale I ist in dieser Stellung der Hand stärker abducirt als bei radialer Abduction der Hand.

Ob diese Röntgogramme eine richtige Vorstellung von der Grösse der Multangulum-majus-Bewegung geben und nicht auch durch Ungleichförmigkeit bei der Radiographirung oder Rollung der Hand Veränderungen des Projectionsbildes der Multangula eingetreten sind, ist nicht sicher zu entscheiden möglich. — In beiden Fällen erscheint indess diese Bewegung grösser als in meinen Fällen.

Die Fälle betreffend, von denen keine Bilder wiedergegeben werden, will ich einige Erscheinungen erwähnen, welche über die Bewegungen der Multangula und über das Maass, in welchem diese Knochen von den Abductionsbewegungen der Hand beeinflusst werden, weitere Aufklärung geben.

In einer Hand — von einer Dame im mittleren Alter —, die in

Streckstellung radiographirt wurde, bei einer Exponirung mit abducirtem Daumen, bei einer anderen Exponirung mit Hand und Arm unverrückt, aber mit maximal opponirtem Daumen, ist das Bild des Multangulum majus bei Opposition des Daumens 1 ^{mm} in ulnarer und 1·5 ^{mm} in distaler Richtung verschoben, was eine sehr kleine Bewegung in pronatorischer und distaler Richtung angiebt.

In Fall I *a* ist bei der Bewegung der Hand zwischen den Stellungen 1 und 2 das Metacarpale I in geringem Grade abducirt worden. Dabei ist keine seitliche Verschiebung des Multangulum majus gegen das Mult. minus erfolgt, nur Rotation im Carpometacarpalgelenke; dagegen hat sich das Multangulum majus 2 ^{mm} in distaler Richtung gegen das Multangulum minus bewegt. Diese Verschiebung ist ebenso gross wie die gleichzeitige Erhebung des Naviculare im Verhältniss zum Capitatum (s. S. 204), und die distale Contour des Naviculare ist während der Verschiebung im Contact mit der proximalen Contour des Multangulum majus geblieben. Diese Erhebung des Multangulum majus scheint in Folge dessen von der Rotation in radialer Richtung im Intercarpalgelenke verursacht zu sein, wodurch das Capitatum sich in proximaler Richtung im Verhältniss zur distalen Fläche des Naviculare bewegt hat, welche das Multangulum majus in distaler Richtung verschoben hat.

Ob das Multangulum minus an den Bewegungen des Multangulum majus Theil nimmt, ist auf meinen Röntgogrammen von erwachsenen Händen unmöglich sicher zu entscheiden, weil weder die Contour des Multangulum minus gegen das Multangulum majus, noch dessen Grenze gegen das Capitatum in ihrer ganzen Ausdehnung deutlich hervortritt; so viel ich aber aus den sichtbaren Contouren ersehen kann, bleibt das Multangulum minus gegen das Capitatum unbeweglich. In Fall II, wo die Verknöcherung nicht zur ganzen Masse der Carpalknochen fortgeschritten ist, geben die ossösen Partien der Multangula völlig distincte Contouren sowohl gegen einander, als gegen das Capitatum. In diesem Falle hat das Bild des Multangulum minus seine Stellung zum Capitatum beibehalten, obgleich das Bild des Multangulum majus sich sowohl seitwärts, wie in proximo-distaler Richtung bewegt hat.

Eine Bewegung zwischen dem Multangulum minus und dem Capitatum giebt sich also auf diesen Röntgogrammen nicht zu erkennen.

In Fall III ist der Daumen bei radialer Abduction der Hand stärker abducirt als bei deren ulnarer Abduction, die Abduction des Metacarpale I aber ist nicht von einer merkbaren Verschiebung des Multangulum majus in radialer Richtung begleitet im Verhältniss zu den übrigen Knochen in der distalen Carpalreihe, dessen Bild aber ist

in distaler Richtung gegen das Bild des Multangulum minus verschoben, und zwar ebenso viel, als die distale Contour des Naviculare sich im Verhältniss zum Capitatum verschoben hat.

In Fall V sind die Röntgogramme von den Stellungen 4 und 5, wo die letztere Stellung extreme radiale Abduction ist, von Interesse, weil beim Uebergang von der vorigen Stellung zur letzteren das Bild des Multangulum majus sich 1 mm in ulnarer (pronatorischer) Richtung gegen das Multangulum minus verschoben hat, ohne dass der Daumen eine Bewegung ausgeführt hat.

Dies sind die einzigen von meinen Röntgogrammen, welche eine unabhängig von der Bewegung des Daumens während der Abductionsbewegung der Hand auftretende Rotation um eine Längsaxe zwischen den Multangula zeigen.

Dieser Fall weicht indess von allen übrigen Fällen auch dadurch ab, dass in der proximalen Carpalreihe das Naviculare bei radialer Abduction in pronatorischer Richtung, und das Triquetrum in supinatorischer Richtung rotirt sind, d. h. dass die Randpartien der proximalen Carpalreihe gegen einander gebogen worden sind. Es ist keine Ursache zu der Annahme vorhanden, dass ein fehlerhaftes Bild vorliegt, das durch Rollung der ganzen Hand zu Stande gekommen ist, denn das Capitatum, Hamatum und alle Metacarpalknochen haben alle in sämmtlichen Stellungen die gleichen Bilder gegeben.

Aus dem Erwähnten geht hervor, dass die Abductionsbewegungen der Hand keine zwangsmässigen pro- oder supinatorischen Bewegungen der Multangula hervorrufen. Grössere Opposition oder Abduction des Daumens bewirkt eine kleine pro- bezw. supinatorische Biegung des Multangulum majus gegen das Mult. minus. Kleine Bewegungen des Metacarpale I (Fall I und III) verursachen keine Bewegung des Multangulum majus in supinatorischer oder pronatorischer Richtung. In einigen Fällen treten Contourverschiebungen auf, welche zu der Annahme Veranlassung geben, dass das Multangulum majus von den Abductionsbewegungen der Hand in der Weise beeinflusst wird, dass es durch die Rotation im Intercarpalgelenke eine geringe Verschiebung gegen das Multangulum minus in distaler Richtung bei der radialen Abduction, in proximaler Richtung bei der ulnaren Abduction erfährt.

Ob die Verschiebung des Multangulum majus in proximo-distaler Richtung eine nothwendige Folge der Bewegung des Capitatum gegen das Naviculare ist, oder ob diese Bewegung erfolgen kann, ohne dass das Multangulum majus von derselben beeinflusst wird, darüber kann das vorliegende Material keinen entscheidenden Aufschluss geben.

Grössere Bewegungen des Daumens rufen auch, wie gezeigt, eine kleine Erhebung (bei Adduction und Opposition) oder Senkung (bei Uebergang von der Opposition zur Abduction) des Multangulum majus gegen das Multangulum minus hervor.

Es lässt sich schwer entscheiden, ob es die Rotation im Intercarpalgelenke, oder die Bewegung des Daumens ist, welche für die Bewegung des Multangulum majus gegen das Multangulum minus in proximo-distaler Richtung bestimmend ist, falls diese Bewegungen betreffs der Hebung oder Senkung des Multangulum majus einander entgegenwirken. Da aber in allen hier vorliegenden Fällen das Multangulum majus, in welcher Stellung der erste Metacarpalknochen sich auch befinden mag, bei der radialen Abduction der Hand mehr distal gegen das Multangulum minus verschoben ist als bei ulnarer Abduction, scheint das Multangulum majus nicht durch die Muskelwirkung auf das Metacarpale I in proximaler Richtung weiter verschoben zu werden, als die durch die Abductionsbewegung der Hand bedingte Stellung des Naviculare erlaubt.

H. Virchow sagt (5: S. 470), wenn er von den pronatorischen und supinatorischen Bewegungen innerhalb des Carpus spricht: „Die Bewegung, von welcher hier die Rede ist, ist keinesfalls eine einfache Drehbewegung, bei welcher sich etwa die distale Reihe als ein Ganzes um eine Längsaxe drehte, sondern die einzelnen Knochen ändern ihre Stellung zu einander.“ An einer anderen Stelle (3: S. 80) sagt er von denselben Bewegungen: „Sucht man diese Bewegung zu unterdrücken, etwa indem man die Hand auf einem Tisch gleitend gegen den ulnaren und radialen Rand bewegt, so stellen sich compensirend die entgegengesetzten Bewegungen im Arme ein, bei radialer Abduction der Hand Pronation, bei ulnarer Abduction Supination, zum Beweise, dass die erwähnten Bewegungen zwangsmässige sind.“ S. 470, 5, präcisirt er genauer, was hier unter „zwangsmässig“ zu verstehen ist, indem er hervorhebt, „dass es sich um zwangsmässige Begleiterscheinungen handelt, welche aus der Mechanik der Gelenke erklärt werden müssen.“

Es ist indess dargethan worden, dass Rollungen bei den Abductions- wie Flexionsbewegungen der Hand zwischen der gesammten Hand und dem Vorderarm stattfinden.

W. Braune und O. Fischer (9) haben nämlich gezeigt, dass nur bei Bewegungen in Ebenen, die durch eine für jede Hand gegebene Primärstellung fallen, die Hand denselben Rollungsgrad beibehält, während die Bewegungen in allen anderen Ebenen von einer Rollung der Hand gegen den Vorderarm begleitet werden, und dass

also die Hand bei Bewegungen gegen den Vorderarm dem Gesetze folgt, welches Listing für die Augenbewegungen zu gelten entdeckt hat. Sie haben auch dargethan, dass die ganze Hand, wenn der Vorderarm fixirt wird, bei Ausführung jeder Abductions- oder Flexionsbewegung, die in einer Ebene stattfindet, welche nicht durch die genannte Primärstellung fällt, eine bestimmte Rollung gegen den Vorderarm macht, so dass jeder Stellung in der Frontal- und Sagittalebene eine für diese Stellung constante Rollung um die Längsaxe der Hand entspricht, d. h. dass die Bewegungen des Handgelenkes Donders' Gesetz der constanten Orientirung folgen.

Ob es der Bau des Gelenkes ist, oder ob es, wie beim Auge, die Innervation und Anordnung der Musculatur ist, welche das Gelenk seine Bewegungen nach den Gesetzen ausführen lässt, die von Listing und Donders dargethan sind, das ist auf den Röntgogrammen unmöglich zu entscheiden. Wenn aber diese Bewegung eine Folge der Nebenwirkung der Muskeln ist, dann ist es klar, dass die Muskeln, welche, wenn der Vorderarm fixirt ist, bei der Abduction in einer gewissen Richtung die Hand nach einer gewissen Richtung rollen, wenn der Arm dagegen beweglich ist, die Hand aber durch eine besondere Anordnung gehindert wird, bei der Abductionsbewegung gerollt zu werden, eine der vorhergehenden Rollung entgegengesetzte Bewegung des Armes bewirken werden.

Ist es der Bau des Gelenkes, wodurch eine Rollung der Hand in einer gewissen Richtung zwangsmässig hervorgerufen wird, so wird auch, wenn die Hand verhindert ist zu rollen, der Unterarm bei der Abductionsbewegung eine Rollung in entgegengesetzter Richtung ausführen.

Dieser Umstand kann also nicht als ein Beweis für eine von dem Bau des Gelenkes verursachte Zwangsbewegung zwischen den einzelnen Knochen der Handwurzel benutzt werden.

Es ist nicht meine Absicht gewesen, mittels Röntgographirung die bei den Abductions- und Flexionsbewegungen auftretenden rotirenden Mitbewegungen der Hand gegen den Vorderarm zu studiren. Diese Bewegungen werden mit weit grösserem Vortheil nach anderen Methoden studirt. Im Gegentheil hat es in meinem Plane gelegen, die Rollungsbewegungen zwischen der Hand und dem Vorderarm so viel als möglich auszuschliessen. Dass es auch gelungen ist, durch Gegenwirkung gegen die rollende Nebenwirkung der Muskeln eine reine Abductionsbewegung der Hand zu erhalten, spricht dafür, dass diese Rollung nicht von dem Bau des Gelenkes hervorgerufen ist, sondern durch die Anordnung und Innervation der abducirenden Muskeln

zu Stande kommt, obgleich es auch möglich ist, dass die bei der Bewegung der Hand in der Frontalebene eintretende Rollung zwischen der Hand und dem Vorderarm so unbedeutend ist, dass sie sich auf den Röntgogrammen nicht erkennen lässt.

Die Nebenwirkung der abducirenden Muskeln auf die Radioulnargelenke lässt sich beim Röntgographiren nur mit grösster Schwierigkeit aufheben, so dass die Hand dadurch nicht gerollt wird. Vielleicht ist es die Rotation von Ulna und Oberarm gegen den Radius, welche eintreten will, wenn die Hand und dadurch der Radius zu rollen verhindert wird, was H. Virchow zu oben erwähntem Schluss veranlasst hat.

Die proximale Carpalreihe.

Die Stellungsveränderungen der Knochen in der proximalen Carpalreihe, die sich auf meinen Röntgogrammen zu erkennen geben, stimmen in Vielem mit den von H. Virchow gegebenen Schilderungen überein.

Bei ulnarer Abduction zeigen sie also eine dorsale Flexion der proximalen Carpalreihe gegen den Radius, bei radialer Abduction eine volare Flexion derselben.

Ich habe indess einige neue, zum Theil von H. Virchow abweichende Beobachtungen gemacht, auf welche ich hier die Aufmerksamkeit richten will.

Um eine richtige Auffassung von den Abductionsbewegungen zu erhalten, ist es zunächst von Wichtigkeit, fest zu halten, dass die Seitenbewegungen in beiden Gelenken durch eine Rotation um eine feste, sagittale Axe entstehen. Die Rotation in sagittaler Richtung, die dabei von der proximalen Carpalreihe ausgeführt wird, und die Gleitbewegungen des Triquetrum gegen das Lunatum haben den Zweck, die Randpartien der proximalen Carpalreihe, welche einer Rotation um eine sagittale Axe hinderlich sind, zu senken, oder mit anderen Worten, die Gelenkpfanne des Intercarpalgelenkes zu vermindern.

Ich habe dies hervorheben wollen, weil man aus den bisher publicirten Röntgenuntersuchungen leicht die Auffassung erhält, dass die seitlichen Bewegungen durch eine Zusammenschiebung der Seitenpartien der Handwurzel entstehen.

So sagt H. Virchow (5: S. 468): „Die seitlichen Bewegungen prägen sich aus in Zusammenschiebung der seitlich gelegenen Knochen und können durch Maasse ausgedrückt werden.“

Naviculare. Eine Rotation im Intercarpalgelenk von der ulnaren

zur radialen Seite wird hauptsächlich dadurch ermöglicht, dass sich das Naviculare nach der volaren Seite wegbiegt, um dem andringenden Capitatum Platz zu machen, und dadurch einer Excursion Raum giebt, die ebenso gross ist als die Verminderung in frontaler Richtung, welche die Gelenkfläche des Naviculare gegen das Capitatum durch diese Flexion erlitten hat. Der Ausschlag im Intercarpalgelenk aber wird auch dadurch etwas erhöht, dass ein Theil der Rotation ohne entsprechende Flexion der proximalen Reihe zu Stande kommen kann.

Dies ist nicht so auffallend, wenn man die verschiedenen Bilder neben einander betrachtet, sobald man aber die Contouren der Bilder des Capitatum über einander placirt, tritt es deutlich hervor. Man erhält indess auch ein überzeugendes Bild davon, wenn man auf den Bildern von ulnarer und radialer Abduction (Taf. V Figg. 1 und 2) auf die Lage der Projection von der distalsten Ecke des Naviculare im Verhältniss zur Projection des radialen, distalen Randes der radialen Gelenkfläche des Capitatum gegen das Naviculare acht giebt. Bei radialer Abduction geschieht diese Verschiebung des Capitatum gegen das Naviculare in proximaler Richtung, bei ulnarer Abduction in distaler Richtung. Die ganze Verschiebung variirt zwischen 1 und 2^{mm}, beträgt aber in der Mehrzahl der Fälle 2^{mm}.

Dies könnte vielleicht eine so geringe Bewegung zu sein scheinen, dass sie nicht erwähnt zu werden verdiente. Eine Verschiebung von 2^{mm} in einem Gelenk, wo der Krümmungsradius der Rotationsfläche nur ungefähr 10^{mm} ist, bedeutet aber einen Ausschlag von ungefähr 11^{0}. Der grösste Ausschlag der Bewegung des Intercarpalgelenkes bei der Abduction, den ich gefunden habe, ist 44^{0}. Die in Frage stehende Verschiebung wird deshalb eine nicht unwesentliche Rolle spielen.

Diese Bewegung des Capitatum gegen das Naviculare scheint, wie erwähnt, in einigen Fällen wenigstens, einen Einfluss auf die Stellung des Multangulum majus auszuüben, das beim Uebergang von ulnarer zu radialer Abduction 1 bis 2^{mm} in distaler Richtung gegen das Multangulum minus zu gleiten scheint.

Es ist ausserordentlich schwer, nach den Röntgogrammen zu entscheiden, ob das Naviculare nebst seiner seitlichen Rotation und seiner dorso-volarflexorischen Bewegung in Folge der Abductionsbewegungen der Hand auch um eine Axe in der Längsrichtung der Hand rotirt hat. Dies scheint indess nicht der Fall zu sein. In Taf. V Fig. 2, radiale Abductionsstellung, ist die volare, ulnare Contour des Naviculare freilich länger auf das Capitatum hinein projicirt als bei der ulnaren Abductionsstellung (Taf. V Fig. 1); diese Contour aber ist

in derselben Entfernung von dem Rotationscentrum der Abductionsbewegungen verblieben. (Das Naviculare behält bei der Abduction des Metacarpale I dieselbe Stellung bei.) Die Verschiebung der volaren, ulnaren Contour des Naviculare ist deshalb aller Wahrscheinlichkeit nach von der seitlichen Rotation des Capitatum gegen das Naviculare veranlasst. In einem Fall (V) scheint es, als ob das Naviculare bei radialer Abduction etwas in pronatorischer Richtung gegen das Capitatum rotirt habe — in demselben Falle hat das Lunatum-Triquetrum bei ulnarer Abduction in pronatorischer Richtung, bei radialer in supinatorischer rotirt. Aus den Randbildern der Abductionsstellungen kann man keinen bestimmten Schluss ziehen betreffs einer möglicher Weise vorkommenden Rotation um eine Längsaxe des Naviculare. Deutliche Zeichen einer solchen giebt es nicht, aber die durch die Dorso-Volarflexion und Seitenrotation hervorgerufenen Projectionsveränderungen können vielleicht durch geringere Rollung verursachte Contourveränderungen verdecken.

Hinsichtlich der Art der Bewegung zwischen dem Naviculare und den Multangula bei der Rotation des Naviculare in der Sagittalebene während der Abductionsbewegungen betont H. Virchow, dass das Naviculare nicht gegen die Multangula rotirt, sondern bei seiner Dorsalflexion gegen den Radius von den Multangula abgehebelt wird.

Der Fall, von welchem es mir gelungen ist, gute Randbilder (Taf. VI Figg. 10 und 11) zu erhalten, scheint diese Beobachtungen zu bestätigen. Ein sicherer Schluss hierüber ist mir indess nicht möglich. Seitwärts rotirt doch das Naviculare gegen die Multangula. Vergleiche die Stellung der distalen Fläche des Naviculare zu den Multangula bei ulnarer Abduction (Taf. V Fig. 1) und bei radialer Abduction (Taf. V Fig. 2)!

Die Neigung des Naviculare gegen die Längsrichtung der Hand bei der Streckstellung derselben scheint, nach den Flächenansichten zu urtheilen, in verschiedenen Fällen etwas zu variiren. Auf dem radialen Randbilde von Fall I (Taf. VII Fig. 18) bildet der dorsale Rand mit der Längsaxe der Hand nach der volaren Seite einen Winkel von ungefähr 50°.

Es erscheint bei dem ersten Blick auf die Röntgogramme (Taf. V Figg. 1 und 2), als ob der proximale ulnare Rand des Naviculare bei der Abduction von der radialen Fläche des Lunatum abgehebelt würde, indem der Zwischenraum zwischen diesen Knochen vergrössert worden ist. Eine Verschiebung des ulnaren Theiles der proximalen Contour des Naviculare in radialer Richtung kommt nämlich in allen Fällen bei radialer Abduction vor. Die Erklärung des Phänomens

dürfte doch nicht darin liegen, dass die Fläche des Naviculare gegen das Lunatum von diesem Knochen abgehebelt wird, sondern ist in der Form des ulnaren Theiles der proximalen Gelenkfläche des Naviculare zu suchen, die bei verschiedenen Flexionsstellungen des Naviculare ein verschiedenes Projectionsbild hervorruft.

Der ulnare Rand der proximalen Fläche des Naviculare verläuft in seiner dorsalen Partie ungefähr parallel mit dem radialen Rande der proximalen Fläche des Lunatum, weicht aber in seinem volaren Theil in einer seichten Curve radialwärts von dem queren Rande des Lunatum ab. Der ulnare Theil der proximalen Fläche des Naviculare hat im volaren Theil auf einem Gebiete, welches von hinten nach vorn an Breite zunimmt, eine stärkere Curvatur in frontaler Richtung als die sonstige Fläche. Ausserdem ist der proximo-ulnare Rand des Naviculare in seinem proximalen und volaren Theil abgerundet, während derselbe in seinem dorsalen Theil einen scharfen Abschluss der proximalen Gelenkfläche bildet.

Bei der ulnaren Abduction, wo die proximale Carpalreihe gegen den Radius dorsalflectirt ist, sind es die dorsalen Theile der proximalen Gelenkflächen des Naviculare und Lunatum, die als Grenzcontouren dieser Knochen projicirt werden. In Taf. V Fig. 1 ist zu sehen, wie in dieser Stellung die gegen einander gerichteten Contouren des Naviculare und Lunatum auf dem Projectionsbilde nahezu gleichlaufend sind (etwas divergirend in proximaler Richtung) bis hinunter zur Gelenkfläche des Radius. Der radiale Rand des Lunatum geht in einer scharfen Ecke in den proximalen über, die ulnare Contour des Naviculare aber geht mit einer abgerundeten Ecke in dessen proximale Contour über, so dass zwischen den proximalen Flächen des Naviculare und Lunatum eine seichte, rinnenförmige Einsenkung vorkommt.

Bei der während der radialen Abduction auftretenden Volarflexion der proximalen Carpalreihe gegen den Radius ist es der volare Theil der proximalen Fläche des Naviculare, welcher auf dem Projectionsbilde die Grenzcontour des Naviculare hervorruft. Wir sehen auch hier (Taf. V Fig. 2 und 3), wie die gegen einander gekehrten Contouren des Naviculare und Lunatum in ihrem distalen Theile ungefähr parallel verlaufen, wie aber die ulnare proximale Ecke des Naviculare gleichsam abgeschnitten erscheint, wodurch die Rinne zwischen den proximalen Flächen der beiden Knochen radialwärts sowohl an der Höhe wie an der Breite vergrössert worden ist.

Mittels eines Zirkels findet man leicht, dass die Projection des Theiles der Gelenkfläche des Naviculare, welcher mit dem Radius in Berührung ist, bis zu einem gewissen Punkte (*e* Taf. V Fig. 3) auf der

Gelenkfläche des Radius eine Kreislinie mit dem Rotationscentrum (M) als Mittelpunkt bildet; von diesem Punkte aber erhebt sich der ulnare Theil der proximalen Gelenkfläche des Naviculare je nach der fortschreitenden radialen Abduction in steigendem Grade über diese Kreislinie.

Auf dem in Taf. V Fig. 3 wiedergegebenen Röntgogramme tritt der grösste Theil der Contour der distalen Gelenkfläche des Radius hervor. Der Punkt L ist über dem höchsten Punkte der auf der Gelenkfläche vorhandenen Leiste angebracht. Wie aus der Figur hervorgeht, bildet die Projection der radial vom Punkte e befindlichen Partie der Gelenkfläche des Radius eine Kreislinie mit dem Rotationscentrum für die Abductionsbewegungen (M) als Mittelpunkt, aber das ulnar vom Punkte e zum Höhenpunkte (L) der Leiste gelegene Gebiet der Gelenkfläche des Radius erhebt sich über diese Kreislinie.

Zeichnen wir auf die Taf. V Figg. 1 und 2, auf welchen die Contour der Gelenkfläche des Radius nicht distinct hervortritt, L und e analog gelegene Punkte, so zeigt es sich, dass bei der ulnaren Abductionsstellung der ulnarste Theil der proximalen Fläche des Naviculare gegen den radialen Theil der Leiste (L—e) ruht. Bei Verschiebung in ulnarer Richtung vom ulnaren Theile des Naviculare während der radialen Abduction hat sich der ulnare Theil seiner proximalen Fläche durch Formveränderung der Contactfläche gegen den Radius, hervorgerufen durch die gleichzeitige Dorso-Volarflexion, allmählich erhoben, wodurch es dem Naviculare möglich geworden ist, unter beibehaltenem Contact mit der radialen Abtheilung der Gelenkfläche, wie mit der Leiste des Radius, um eine durch den Punkt M laufende sagittale Axe zu rotiren.

Es ist zu merken, dass die nun gegebene Beschreibung der Flächen des Naviculare und Lunatum sich auf die ossösen Theile dieser Knochen bezieht. Die auf den Röntgogrammen erscheinende Rinne auf der proximalen Fläche der Carpalreihe zwischen dem Naviculare und Lunatum wird von den ossösen Theilen dieser Knochen begrenzt. In dem intacten Gelenke wird dieser Raum durch die Knorpelbekleildung der Knochen wie durch das Lig. inteross. lunatonaviculare vermindert. Die auf den Röntgogrammen beobachtete Thatsache, dass der ulnare Theil der proximalen ossösen Gelenkfläche des Naviculare beim Passiren eines gewissen Punktes auf der Gelenkfläche des Radius sich von der Bahn erhebt, längs welcher sich das Naviculare gegen den Radius bewegt, zu Folge dessen, dass das Naviculare durch seine Flexion während der Abductionsbewegung die Form des

ulnaren Theiles der dem Radius zugekehrten Fläche verändert, muss auch für den knorpelbekleideten Knochen gelten. Der Knorpel ist ja auch einigermaassen nachgiebig, wie das Bindegewebe, welches sich in der Rinne zwischen dem Naviculare und Lunatum befindet, dem Drucke der Leiste nachgeben dürfte.

In Folge der nun beschriebenen Formveränderungen des ulnaren Theiles der Contactfläche des Naviculare gegen den Radius verhindert nicht die an der Gelenkfläche des Radius befindliche Leiste, die sich über die Rotationsfläche des Radius gegen das Naviculare erhebt, dass das Naviculare unter beibehaltenem Contact mit der radialen Rotationsfläche des Radius wie mit der Leiste seitwärts gegen den Radius um eine durch das gefundene Rotationscentrum (*M*) laufende sagittale Axe in der Ausdehnung rotirt, wie dies bei den Abductionsbewegungen der Fall ist.

Betrachten wir das Verhalten des Lunatum zum Punkt *L*, so ist es erst bei extremer ulnarer Abduction, dass dessen radiale Ecke diesen Punkt überschreitet, und dabei erhebt sich dessen proximale Contour über denselben. Das Verhalten des Lunatum zur Leiste wird im Absch. 4 näher dargelegt. Weder die seitliche Rotation des Naviculare, noch die des Lunatum gegen den Radius wird von der an der Gelenkfläche des Radius befindlichen Leiste bei dem Grade der seitlichen Rotation gestört, der im Radiocarpalgelenke vorkommt.

Andererseits deutet das nun dargelegte Verhalten des Naviculare zur Leiste darauf hin, dass die am Radius befindliche Leiste dazu beiträgt, die Abductionsbewegungen des Radiocarpalgelenkes zu begrenzen und einen festen Gang der Bewegung zu bewirken.

Das Triquetrum. Betreffend die Bewegungen des Triquetrum gegen das Hamatum stimmen meine Röntgogramme völlig mit der von H. Virchow (5) gegebenen Schilderung überein.

Taf. VII Fig. 15 giebt ein Röntgogramm der ulnaren Seite der Hand in Streckstellung wieder. Diese Figur zeigt, wie das Triquetrum in Streckstellung gegen den proximalen Theil der ulnaren Fläche des Hamatum ruht und im Verhältniss zur Längsaxe der Hand etwas volarflectirt ist. Bei der Streckstellung der Hand lässt das Triquetrum den untersten und obersten Theil der ulnaren Fläche des Lunatum unberührt. Betrachten wir die radiale Abductionsstellung der Hand Taf. V Figg. 2 und 3), so zeigt es sich, dass gleichzeitig mit erfolgter Rotation im Intercarpalgelenke, wodurch der ulnare Theil der proxi-

malen Gelenkfläche des Capitatum ausserhalb der Fläche des Lunatum geschoben und das Hamatum in ulnarer Richtung gegen das Triquetrum geglitten ist, das Triquetrum in distaler Richtung gegen das Lunatum geglitten und mit dem radialen Theile seiner distalen Fläche gegen das Capitatum und Hamatum gepresst worden ist. Gehen wir nun zum Bilde der ulnaren Abductionstellung der Hand über (Taf. V Fig. 1), so ist nun das Triquetrum in proximalo-ulnarer Richtung gegen das Lunatum geglitten, so dass deren proximale Gelenkflächen in gleiche Höhe mit einander gekommen sind. Diese Bewegung des Triquetrum gegen das Lunatum zeigt sich in allen Fällen. H. Virchow erwähnt in der Zusammenfassung seiner Beobachtungen (5: S. 480), dass bei radialer Abduction die immerhin feste Verbindung des Triquetrum mit dem Capitatum und Hamatum ein Vergleiten desselben am Lunatum in distaler Richtung erzeuge.

Ich habe diese Bewegung des Triquetrum gegen das Lunatum und deren Eintreten bei ulnarer wie bei radialer Abduction hervorheben wollen, weil sie neben der Dorsal- und Volarflexion des Triquetrum bei Abductionsbewegungen der Hand dadurch von Bedeutung ist, weil sie theils dem ulnaren Rande der Gelenkpfanne des Intercarpalgelenkes Nachgiebigkeit verleiht, theils die Insertion des Musc. flex. carpi uln. bei der ulnaren Abduction ulnarwärts verschiebt.

In den Fällen, wo die Hand eine Rollung während der Abductionsbewegung ausgeführt hat, giebt sich diese Rollung nicht nur durch Contourveränderung bei der distalen Carpalreihe zu erkennen, sondern zeigt sich auch bei der proximalen und tritt ebenfalls auf dem Bilde des Triquetrum hervor. In den Fällen dagegen (siehe Taf. V Figg. 1 und 2), wo keine erkennbare Rollung der gesammten Hand zu Stande gekommen ist, zeigt sich keine Veränderung in den Seitencontouren des Triquetrum, noch eine Veränderung in dessen Breite. Nach den Röntgogrammen zu urtheilen, führt also das Triquetrum keine von der Abduction hervorgerufene supinatorische, noch pronatorische Rollungsbewegung im Verhältniss zu den übrigen Knochen der Handwurzel aus. In einem Falle (V) scheinen indess, wie erwähnt, das Triquetrum und Lunatum bei radialer Abduction in supinatorischer Richtung rotirt zu haben, während das Naviculare eine pronatorische Rotation gemacht hat.

Das Pisiforme. Alle Röntgenbilder der Hand stimmen darin überein, dass sie bei den Abductionsbewegungen eine Verschiebung des Pisiforme gegen das Triquetrum zeigen. Diese Verschiebung ist indess meiner Ansicht nach nicht derart, dass sie eine directe Ein-

wirkung des Musc. flexor carpi uln. auf das Radiocarpalgelenk ausschliesst (5: S. 478).

Wenn man auf das Bild von der ulnaren Abductionsstellung der Hand (Taf. V Fig. 5) das Bild der radialen Abductionsstellung placirt, so kann man, obgleich das Projectionsbild des Triquetrum durch dessen Dorso-Volarflexion theilweise verändert worden ist, doch mit Hülfe der ulnaren Contour und der Doppelcontour der radialen Fläche die Contouren des Triquetrum ziemlich genau in die beiden Stellungen über einander einpassen. Es zeigt sich dann, dass das Pisiforme sich 5 mm gegen das Triquetrum in der Richtung der Linie cp_1 verschoben hat. Diese Bewegung ist ebenso gross als die Verschiebung in derselben Richtung, die vom Hamulus Hamati im Verhältniss zum Triquetrum ausgeführt worden ist. Das Pisiforme hat also an der durch Rotation im Intercarpalgelenke hervorgerufenen Verschiebung des Hamatum in dieser Richtung Theil genommen. Das Hamatum aber bewegt sich gegen das Triquetrum in einer krummen Bahn, so dass der Theil des Hamatum, welcher bei radialer Abduction mit dem Triquetrum in Contact ist, bei dem Uebergange der Hand zu ulnarer Abduction ausser seiner Verschiebung in proximaler Richtung sich auch nach der radialen Seite bewegt hat. Wir können die Verschiebung zwischen dem Hamatum, Triquetrum und Pisiforme in der Richtung der Gelenkfläche des Hamatum gegen das Triquetrum dadurch bestimmen, dass wir die Contouren des Hamatum auf den Bildern der ulnaren und radialen Abductionsstellung (Taf. V Fig. 1 und 2) über einander placiren und die Entfernung zwischen den Bildern des Triquetrum und Pisiforme in den beiden Stellungen zum Hamatum messen.

In Taf. V Fig. 6 sind das Triquetrum und Pisiforme durch ein solches Verfahren in ihrer Stellung zum Hamatum während radialer und ulnarer Abduction gezeichnet.

Die Lage der beiden Knochen während der radialen Abduction der Hand wird durch eine punktirte Contour angegeben, deren Lage bei ulnarer Abduction wird durch zusammenhängende Linien bezeichnet. Die Kreislinie *HM* ist annähernd parallel mit der Curve gezogen, welche die proximale und distale Contour des Triquetrum während der Rotation gegen das Hamatum beschrieben haben. Der Mittelpunkt dieser Kreislinie ist der Punkt *X*. Von diesem Punkte sind die Projectionslinien s_1 und s_2 gezogen, welche den ulnaren Rand des Triquetrum tangiren. Die Entfernung zwischen deren Schneidungspunkten in *HM* ist 11·5 mm. Durch analoge Punkte am radialen Rande des Triquetrum sind die Projectionslinien t_1 und t_2 gelegt. Die

Entfernung zwischen deren Schneidungspunkten in *HM* ist ebenfalls 11·5 mm. Die Verschiebung des Triquetrum im Verhältniss zum Hamatum ist, berechnet längs der Curve *HM*, also 11·5 mm.

Die Linien f_1 und f_2 bezeichnen den grössten Längsdurchmesser des Pisiforme. Dieser ist auf beiden Projectionsbildern gleich gross. In allen übrigen Fällen hat die Projection des Pisiforme denselben Längsdurchmesser beibehalten. Die Punkte 0_1 und 0_2 bezeichnen den Mittelpunkt des Längsdurchmessers des Pisiforme. Der Punkt 0_1 befindet sich auf der Curve *HM*. Von *X* wird die Linie *r* nach 0_2 gelegt und schneidet *HM* 9 mm von 0_1. 0_2 liegt 4 mm entfernt von *HM*. — Während einer Bewegung des Hamatum von 11,5 mm gegen das Triquetrum hat sich also das Pisiforme im Verhältniss zum Triquetrum 2,5 mm längs der Curve *HM* verschoben. In der zu dieser Kreislinie rechtwinkligen Richtung ist es dagegen 4 mm geglitten.

Durch das Lig. piso-hamatum wird die Wirkung des Musc. flexor carpi ulnaris vom Pisiforme, wo die Muskelsehne inserirt, zum Hamulus Hamati hinüber geführt. Das Lig. piso-hamatum aber verläuft bei Streckstellung der Hand nicht in gerader Linie mit der Sehne des Musc. flex. carpi uln., sondern bildet mit dieser einen radialwärts offenen Winkel, der bei radialer Abduction abnimmt.

In Taf. V Figg. 1, 2 und 7 sind die Linien *cP* in derselben Richtung im Verhältniss zum Vorderarm gezogen. Die Linien *ab* verbinden die identischen Punkte *a* auf dem Hamulus Hamati und den Punkt *b* auf dem Pisiforme, welcher den distalen Endpunkt des Längsdurchmessers des Pisiforme bildet. *P* bezeichnet die Kraft, mit welcher der Musc. flexor carpi uln. in der Richtung der Linie *cP* auf das Pisiforme wirkt. Die Linie *ab* giebt approximativ den Verlauf des Lig. piso-hamatum an.

Die Kraft (*P*), welche auf dem Pisiforme durch den Musc. flexor carpi uln. angebracht wird, kann man sich in zwei Composanten vertheilt denken, eine, welche in der Richtung des Lig. piso-hamatum (p_1) wirkt, und eine gegen diese winkelrechte Composante (p_2), welche darnach strebt, das Pisiforme in radialer Richtung zu führen.

Die Wirkung der ersteren Composante resultirt in einer Verschiebung des Pisiforme gegen das Triquetrum in der Richtung des Lig. piso-hamatum (von in diesem Falle 5 mm) und einer entsprechenden Verschiebung des Hamatum gegen das Triquetrum in dieser Richtung.

Die letztere Composante würde, wenn das Pisiforme in ihrer Richtung gegen das Triquetrum frei beweglich wäre, dasselbe radialwärts gegen das Triquetrum führen, bis das Lig. piso-hamatum und die Sehne des Musc. flexor carpi uln. in ihrer Richtung zusammenfielen, ohne

dass der Musc. flexor carpi uln. einen directen Einfluss auf die proximale Carpalreihe ausübte. Die Beweglichkeit des Pisiforme gegen das Triquetrum in radialer Richtung ist indess sehr begrenzt, was daraus hervorgeht, dass, wie soeben gezeigt, bei Bewegung des Hamatum gegen das Triquetrum in der Richtung der Gelenkfläche des Hamatum, berechnet längs der Curve *HM*, sich das Pisiforme nur $2 \cdot 5^{mm}$ gegen das Triquetrum verschoben hat, während die Verschiebung des Hamatum $11 \cdot 5^{mm}$ beträgt.

In Fall I betragen die entsprechenden Verschiebungen $2 \cdot 5^{mm}$ und 10^{mm}, in Fall III 2^{mm} und 9^{mm}, und in Fall V 1·5 und 13^{mm}. In Fall II ist das Pisiforme noch nicht verknöchert. In Fall IV *a* sieht man gar keine Verschiebungdes Pisiforme gegen das Triquetrum in der Richtung der Gelenkfläche des Hamatum, hier aber ist durch die pronatorische Rollung der Hand bei ulnarer Abduction das Pisiforme bei dieser Handstellung mehr ulnar auf das Triquetrum projicirt worden, als wie es der Fall gewesen wäre, wenn die Hand ihre Neigung zur Platte beibehalten hätte. In Folge dessen tritt in diesem Falle nicht die geringe seitliche Verschiebung des Pisiforme gegen das Triquetrum bei dem Vergleich zwischen der Stellung der Knochen bei ulnarer und radialer Abductionsstellung hervor.

In den Fällen I und III dürfte wegen desselben Umstandes die Verschiebung des Pisiforme gegen das Triquetrum seitwärts etwas grösser sein, als es scheint.

Es gilt nun zu untersuchen, ob die seitliche Bewegung, welche zwischen dem Pisiforme und Triquetrum möglich ist, genügt, um das Lig. piso-hamatum und die Sehne des Musc. flexor carpi uln. in dieselbe Richtung zu bringen, oder ob sich auch nach der Gleitung des Pisiforme ein Winkel zwischen ihnen vorfindet und man also annehmen kann, dass die in radialer Richtung wirkende Composante (p_2) durch die Spannung in den das Pisiforme und Triquetrum verbindenden Bändern auf das Triquetrum übertragen wird und demnach Rotation im Radiocarpalgelenke bewirkt. Die Taf. V Figg. 1, 2 und 7 (Fall IV *b*) erklären dies.

Bei radialer Abductionsstellung der Hand (Taf. V Fig. 2) bildet *cP* mit *ab* einen radialwärts offenen Winkel von 157°. Die Kraft p_2 ist bestrebt, das Pisiforme in radialer Richtung zu führen.

$p_2 : P = \sin 23^\circ = 0 \cdot 391$. p_2 ist also ungefähr $^4/_{10}$ von *P*.

In Fig. 7 Taf. V ist die Veränderung veranschaulicht, die unter der Voraussetzung, dass nicht gleichzeitig eine Rotation im Radiocarpalgelenke stattfindet, in der Stellung von *cP* zu *ab* wegen der Gleitung des Pisiforme gegen das Triquetrum und in Folge der Stel-

lungsveränderung des Hamatum zum Pisiforme durch die Rotation im Intercarpalgelenke wie durch die Gleitung des Triquetrum gegen das Lunatum eintreten würde.

Taf. V Fig. 7 ist in der Weise gewonnen, dass über das Bild von der radialen Abductionsstellung der Hand (Taf. V Fig. 2), deren Contouren hier mit ausgezogenen Linien gezeichnet sind, das Bild der ulnaren Abductionsstellung (Taf. V Fig. 1), deren Contouren hier punktirt sind, so eingepasst ist, dass das Rotationscentrum (M), die ulnare und radiale Contour des Lunatumkörpers, der distale Theil der ulnaren Contour des Naviculare, wie die Partie der proximalen Contour des Naviculare, die mit dem radialsten Theile der Gelenkfläche des Radius im Contact ist, auf den beiden Bildern zusammenfallen — also dasselbe Verfahren wie bei der Bestimmung der Rotation des Intercarpalgelenkes.

Der Winkel zwischen cP und ab ist allerdings vergrössert, aber nur um etwa 5°, so dass er jetzt etwa 162° beträgt. Nun ist $p_2 : P = \sin 18^{\circ} = 0 \cdot 309$. $^3/_{10}$ von P sind also in der Richtung von p_2 noch wirkend.

Bei ulnarer Abductionsstellung der Hand (Taf. V Fig. 1), wenn eine Rotation auch im Radiocarpalgelenke ausgeführt worden ist, weichen ab und cP dagegen nur 5° ab, um in ihrer Richtung zusammen zu fallen. Nun ist $p_2 : P = \sin 5^{\circ} = 0 \cdot 087$.

Hieraus geht hervor, dass die in radialer Richtung wirkende Composante (p_2) nicht durch die Gleitung des Pisiforme gegen das Triquetrum neutralisirt worden ist, sondern durch Spannung der Bänder, welche einer seitlichen Verschiebung des Pisiforme gegen das Triquetrum entgegen wirken, auf die proximale Carpalreihe übergeleitet worden ist und eine Rotation derselben gegen den Radius bewirkt hat.

Es ist dabei von grösstem Interesse zu beobachten, dass die durch die Rotation der proximalen Carpalreihe bewirkte Ausgleichung von dem Winkel zwischen dem Ligamentum piso-hamatum und der Sehne des Musc. flex. carpi uln. nicht durch radiale Verschiebung der Insertionsfläche des genannten Muskels auf der proximalen Reihe, sondern durch die von der Rotation hervorgerufene ulnare Verschiebung des Hamulus Hamati zu Stande kommt.

Die Gelenkfläche des Triquetrum gegen das Pisiforme erleidet, wegen der Lage derselben zur Rotationsaxe, kaum eine merkbare seitliche Verschiebung durch die Ulnarrotation der proximalen Reihe. Die Bewegung des Triquetrum gegen das Lunatum bewirkt aber eine ulnare Verschiebung der Insertionsfläche des Musc. flex. carpi uln. bei der

ulnaren Abduction. Bei der ulnaren Abductionsstellung der Hand bildet nämlich die ulnare Fläche des Lunatum einen ulnarwärts offenen Winkel gegen die Längsrichtung des distalen Radiusendes von etwa 30° (s. Taf. V Fig. 1.) Das Triquetrum hat sich beim Uebergang der Hand von radialer zu ulnarer Abductionsstellung etwa 6 mm längs dieser Fläche bewegt. In Folge dieser Bewegung soll das Triquetrum, wie ja leicht zu finden ist, nicht nur etwa 5 mm in proximaler Richtung, sondern auch etwa 3 mm in ulnarer Richtung verschoben worden sein. Ein Punkt auf dem Bilde des Triquetrum, der annähernd dem Mittelpunkte von dessen Gelenkfläche gegen das Pisiforme entspricht, hat sich auch in der That bei der ulnaren Abduction etwa 3 mm ulnarwärts verschoben. Durch diese ulnare Verschiebung der Insertionsfläche des Musc. flex. carpi uln. auf dem Triquetrum bei der ulnaren Abduction, in Folge der Bewegung des Triquetrum gegen das Lunatum, wird die directe ulnarrotirende Wirkung dieses Muskels auf die proximale Carpalreihe vergrössert, indem nur die ulnare Verschiebung des Hamulus Hamati den radialwärts offenen Winkel zwischen dem Ligamentum piso-hamatum und der Sehne des Musc. flex. carpi uln. auszugleichen strebt, während die ulnare Verschiebung der Insertionsfläche des genannten Muskels auf der proximalen Carpalreihe die Beibehaltung dieses Winkels bezweckt.

Während die in radialer Richtung wirkende Composante des Musc. flex. carpi uln. also nicht eine entsprechende Verschiebung des Pisiforme gegen das Triquetrum, sondern hauptsächlich eine Rotation im Radiocarpalgelenke verursacht hat, bewirkt dessen in der Richtung des Lig. piso-hamatum laufende Composante dagegen eine Verschiebung des Pisiforme am Triquetrum und eine entsprechende Verschiebung des Hamatum gegen das Triquetrum, d. h. eine Rotation im Intercarpalgelenk.

Es ist also anzunehmen, dass der Musc. flex. carpi ulnaris in Folge der Verschiebbarkeit des Pisiforme gegen das Triquetrum in der Richtung des Lig. piso-hamatum und wegen seiner geringen seitlichen Beweglichkeit gegen dasselbe einen directen Einfluss auf die beiden Carpalgelenke ausübt, als ob dessen Sehne durch einen an der Gelenkfläche des Triquetrum gegen das Pisiforme angebrachten Block liefe,' um auf dem Hamulus Hamati zu inseriren.

In dem Maasse, wie die Friction zwischen dem Pisiforme und Triquetrum durch vermehrte Spannung der sie vereinenden Bänder bei dessen Bewegung in der Richtung des Lig. piso-hamatum zunimmt, übt auch die in dieser Richtung wirkende Composante des Musc. flex.

carpi uln. eine rotirende Einwirkung auf die proximale Carpalreihe aus, weil ein statisches Moment für diese Kraft hinsichtlich des Rotationscentrums des Radiocarpalgelenkes existirt.

Durch das Ligamentum piso-metacarpum wirkt der Musc. flex. carpi uln. nicht auf die distale Carpalreihe ein, denn dieses Ligament erschlafft bei ulnarer Abduction, indem die Basis des Metacarpale V sich dem Pisiforme nähert.

Die Beweglichkeit des Pisiforme gegen das Triquetrum dürfte ausser darum, dass es eine Einwirkung des Musc. flex. carpi uln. auf das Intercarpalgelenk erlaubt, für die Rotation im Intercarpalgelenke auch deshalb sehr wichtig sein, weil dadurch die Verbindung des Hamatum mit dem Triquetrum vermittelst des Lig. piso-hamatum und des Pisiforme eine entsprechende Dehnbarkeit erhält. Dadurch erhält das Intercarpalgelenk grössere Möglichkeit zur Excursion in radialer Richtung, und dadurch wird das Lig. piso-hamatum bei ulnarer Abduction gespannt, was dem Gelenk grössere Festigkeit giebt.

Das Lunatum. Der Grad der dorso-volaren Flexion des Lunatum gegen den Radius während der Abductionsbewegungen der Hand lässt sich auf den Randbildern der Abductionsstellungen unmöglich genau bestimmen, da in Folge der Röntgenanordnung weder der Radius, noch das Lunatum in den beiden Stellungen hat identische Bilder geben können. Die Vergrösserung ist ja auch nicht dieselbe. Durch eine approximative Einpassung der Contouren der Knochen in den beiden Stellungen über einander habe ich indess versucht, die Grösse dieser Bewegungen annähernd zu bestimmen.

Auf den ulnaren Randbildern (Taf. VI Figg. 8 und 9) sind die mit a bezeichneten Linien in derselben Richtung zum Radius gezogen, ebenso die Linien a auf den radialen Randbildern (Taf. VI Figg. 10 und 11). Die Linie a_1 auf dem ulnaren Abductionsbilde von der ulnaren Seite (Taf. VI Fig. 8) ist im Verhältniss zum Lunatum analog der Linie a auf dem radialen Abductionsbilde von derselben Seite (Taf. VI Fig. 9) gelegt. Auf den Bildern der radialen Seite der Hand ist die Linie a_1 auf dem Radial-Abductionsbilde (Taf. VI Fig. 11) in derselben Stellung zum Lunatum wie die Linie a auf dem Ulnar-Abductionsbilde (Taf. VI Fig. 10) gelegt. Auf den ersteren Bildern erhält man bei dem Uebergange von ulnarer zu radialer Abduction eine Volarflexion des Lunatum gegen den Radius von etwa 20°, auf den letzteren eine Flexion in derselben Richtung von etwa 18°. Die Flexion des Lunatum gegen den Radius während

der Abductionsbewegungen scheint also in diesem Falle ungefähr 20° zu betragen.

Auf den Randbildern der radialen Handseite ist die Linie *b* in dieselbe Richtung zum Radius gelegt. Die Linie b_1 auf dem Radial-Abductionsbilde (Taf. VI Fig. 11) ist so genau wie möglich in derselben Stellung zum Naviculare angebracht wie die Linie *b* auf dem Ulnar-Abductionsbilde (Taf. VI Fig. 10). Beim Uebergange von ulnarer zu radialer Abduction zeigt das Naviculare dieser Bestimmung gemäss eine Volarflexion von ungefähr 16°. Diese Flexion des Lunatum war nach denselben Bildern ungefähr 18°.

Das Naviculare und Lunatum scheinen also in gleichem oder nahezu gleichem Grade an der Rotation im Sagittalplane bei den Abductionsbewegungen Theil zu nehmen. Der Unterschied im Ausschlage ihrer Bewegung kann sehr wohl davon abhängig sein, dass die Constructionslinien nicht ganz genau in derselben Lage zu den betreffenden Knochen haben angebracht werden können.

Wie auf den Bildern zu sehen ist, hat die Contour des Naviculare ihre Stellung zum Lunatum nicht wesentlich verändert, was darauf deutet, dass sie in demselben Grade flectirt worden sind. Ob eine geringe Rotation in dorso-volarer Richtung zwischen dem Naviculare und Lunatum bei den Abductionsbewegungen der Hand vorkommt, lässt sich indess nach diesen Bildern nicht sicher entscheiden.

Das Lunatum zeigt — wenn nicht gleichzeitig die ganze Hand rotirt wird — bei den Abductionsbewegungen keine Contourveränderungen, welche auf eine Rotation um eine Längsaxe deuten, ausgenommen in einem Falle (s. S. 200).

Bühler's Bilder, nach welchen das Lunatum bei den Abductionsbewegungen eine hochgradige Rotation um eine Längsaxe ausführt, sind wahrscheinlich dadurch zu Stande gekommen, dass die Stellung der Röntgenlampe in querer Richtung im Verhältniss zur Hand bei der Aufnahme der drei Momente der Bewegung verschieden gewesen ist.

Die Rotation der proximalen Carpalreihe im Sagittalplane bei den Abductionsbewegungen der Hand giebt sich nicht durch eine entsprechende Bewegung der ganzen Hand zu erkennen. Hieraus folgt eo ipso, dass in der Handwurzel eine Bewegung in entgegengesetzter Richtung stattfindet, wodurch die dorso-volare Rotation im Radiocarpalgelenke neutralisirt wird.

Eine compensirende Rotation im Intercarpalgelenke giebt sich auch auf sämmtlichen Röntgogrammen zu erkennen. Wenn wir die

Projection des Lunatum auf den Flächenansichten der Radial-Abductionsstellung (Taf. V Fig. 2) und der Ulnar-Abductionsstellung (Taf. V Fig. 1) vergleichen, so hat das volare Horn des Lunatum in der letzteren Stellung sich gegen das Capitatum erhoben, während das Capitatum kein Zeichen von einer Rotation im Sagittalplane zeigt. Hieraus geht hervor, dass das Lunatum während des Ueberganges der Hand von radialer zu ulnarer Abduction gegen die distale Carpalreihe volar rotirt worden ist, während es gleichzeitig gegen den Radius dorsal rotirt wurde. Diese Erhöhung des volaren Hornes ist in den verschiedenen Fällen verschieden gross, weshalb die eintretende Flexion auch in verschiedenen Fällen variiren dürfte.

Auf den Randbildern liegt die Sache noch klarer. Auf den Bildern von der ulnaren Seite der Hand sieht man, wie auf dem Ulnar-Abductionsbilde (Taf. VI Fig. 8) das volare Horn des Lunatum höher hinauf gegen die volare Contour des Capitatum und Hamatum steht als auf dem Radial-Abductionsbilde (Taf. VI Fig. 9), während sich das dorsale Horn im Verhältniss zu der dorsalen Contour dieser Knochen gesenkt hat. Das Lunatum ist also bei der ulnaren Abduction gegen die distale Carpalreihe volar flectirt worden.

Auf den radialen Randbildern sieht man, wie auch das Naviculare bei ulnarer Abduction gegen die distale Carpalreihe volar flectirt worden ist. Man vergleiche die Stellung der dorsalen Contour des Naviculare zur proximalen Contour der Multangula auf den beiden Bildern (Taf. VI Fig. 10 und 11).

Auf den ulnaren Randbildern läuft die Linie a in gleicher Richtung nicht nur zum Radius, sondern nimmt auch zu dem Bilde des Capitatum und Hamatum eine analoge Lage ein. Man vergleiche ihre Lage zur volaren Contour dieser Knochen in Taf. VI Fig. 8 und 9. In Folge dessen kann man annehmen, dass keine Dorsovolarflexion der gesammten Hand gegen den Radius stattgefunden, die die Bewegung im Radiocarpalgelenke hervorgerufen hat. Aus der Stellung der Linie a_I zur Linie a Taf. VI Fig. 8 geht deutlich hervor, dass das Lunatum bei dem Uebergang der Hand von radialer zu ulnarer Flexion in gleichem Grade gegen die distale Carpalreihe volarflectirt ist, wie sie gegen den Radius dorsalflectirt ist.

Auf den radialen Randbildern ist das Projectionsbild des Capitatum und Hamatum und der Knochen der Mittelhand in so hohem Grade verändert worden, dass diese keinen Anhalt zur Beurtheilung geben, in welchem Grade das Naviculare und Lunatum gegen die distale Carpalreihe flectirt worden sind. Berechnet man indessen die

Grösse der Bewegung nach der Neigung der betreffenden Knochen gegen die proximale Contour der Multangula, so erhält man dieselben Ausschläge wie für die Flexion gegen den Radius, jedoch in entgegengesetzter Richtung.

Die Messungen, welche ausgeführt werden können, zeigen also eine gleich grosse dorsovolarflexorische Bewegung im Radiocarpal- und Intercarpalgelenke. Daher, dass die Abductionsbewegung ohne gleichzeitige Flexion der Hand ausgeführt werden kann, ist es auch selbstverständlich, dass die Bewegung in beiden Gelenken gleich gross ist.

Bei ulnarer Abduction wird also die proximale Carpalreihe im Intercarpalgelenke gegen die distale Carpalreihe volarflectirt und führt eine compensirende Dorsalflexion gegen den Radius im Radiocarpalgelenke aus. Bei radialer Abduction erfolgt Dorsalflexion der proximalen Carpalreihe im Intercarpalgelenk und eine entsprechende Volarflexion im Radiocarpalgelenk.

Henke's Beobachtungen sind also insofern richtig, als bei den Abductionsbewegungen der Hand in beiden Carpalgelenken eine Rotation in der Sagittalebene ausgeführt wird, und zwar in entgegengesetzter Richtung. Die Röntgogramme aber zeigen, dass die Abductions- und Flexionsbewegungen nicht um für die Flexions- und Abductionsbewegungen gemeinsame schiefe Axen, sondern um besondere sagittale und transversale Axen ausgeführt werden.

Braune und Fischer haben auch bei ihrem S. 185 angeführten Versuche diese Bewegung zwischen dem Capitatum und Lunatum um eine horizontale Axe, wie auch deren Bewegung um eine sagittale Axe, bei der Abductionsbewegung der Hand beobachtet. Sie sagen (8: S. 126): „Sehr interessant war dabei zu beobachten, dass die beiden Drahtspitzen, hauptsächlich die mit Lunatum verbundene, neben ihrer Bewegung in horizontaler Richtung noch eine Erhebung über der Horizontalebene zeigten, was auf eine dementsprechende Bewegung des Lunatum und Capitatum um eine horizontale Axe schliessen lässt, neben ihrer Bewegung um eine Verticalaxe.“

H. Virchow beschreibt die dorso-volaren Flexionsbewegungen der proximalen Carpalreihe im Radiocarpalgelenke während der Abductionsbewegungen, leugnet aber eine compensirende Bewegung im Intercarpalgelenk. Er sagt (5: S. 470): „Nothwendig ist es nicht, aus einer flexorischen Bewegung des proximalen Gelenkes auf eine solche des distalen zu schliessen. Jedenfalls darf man sagen, falls eine derartige Bewegung vorliegt, so ist sie ganz unbedeutend und an Ausdehnung mit der Bewegung im proximalen Gelenk nicht zu vergleichen.“

Wenn nun also die proximale Carpalreihe im Radiocarpalgelenke flectirt wird, aber keine compensirende Bewegung in entgegengesetzter Richtung im Intercarpalgelenke stattfindet, wie soll dann erklärt werden, dass nicht die gesammte Hand flectirt wird?

Um zu beweisen, dass im Intercarpalgelenke keine flexorische Bewegung ausgeführt wird, verweilt H. Virchow bei der Bewegung zwischen den Multangula und dem Naviculare wie zwischen dem Naviculare und Radius. Er schildert dabei, wie beim Uebergange von ulnarer zu radialer Abduction die Multangula durch die an der Mittelhand inserirenden Muskeln gegen das Naviculare gepresst werden, wodurch der nach hinten klaffende Spalt zwischen diesen Knochen geschlossen und das Naviculare im Radiocarpalgelenk volarflectirt wird. Er fasst das Resultat seiner Beweisführung folgendermaassen zusammen (5: S. 474):

„Die Multangula setzen sich nach meiner Deutung fest auf die wie ein Hebel volarwärts ragende Tuberositas des Kahnbeines und zwingen diesem die Drehung auf; anstatt zweier abstracter flexorischer Bewegungen, einer in jedem der beiden Gelenke, für welche die bestimmenden Kräfte nicht ersichtlich waren, werden wir hingewiesen auf den wirklichen Angriffspunkt der Muskeln an dem mit der distalen Reihe amphiarthrotisch verbundenen Metacarpus und erkennen die thatsächlich stattfindende flexorische Bewegung des Kahnbeines als eine Folge eines längs gerichteten Zuges."

Wenn aber die Multangula gegen das Naviculare gepresst und der zwischen ihnen befindliche, nach hinten klaffende Spalt geschlossen wird, was ist das, wenn nicht eine Dorsalflexion im Intercarpalgelenk zwischen den Multangula und dem Naviculare, wenn auch diese Flexion nicht durch eine Rotation zwischen diesen Knochen zu Stande kommt? Warum ist keine Rücksicht darauf genommen worden, dass wohl nicht die flexorischen Bewegungen des Lunatum und Triquetrum im Radiocarpalgelenke davon compensirt werden können, dass der Spalt zwischen dem Naviculare und den Multangula geschlossen wird? Von Wichtigkeit ist es auch, sich daran zu erinnern, dass das Naviculare bei seiner Flexion sich nicht nur gegen die Multangula, sondern auch gegen das Capitatum bewegt.

Die Muskeleinwirkung, von welcher die flexorischen Mitbewegungen bei der Abduction eine Folge sind, kann man sich in der Weise functioniren denken, dass, wenn wir den Uebergang der Hand von ulnarer zu radialer Abduction betrachten, die distale Carpalreihe gegen die aufstehende radiale Kante der Gelenkpfanne des Intercarpalgelenkes (= Naviculare) gepresst wird, die, wenn ihre Stellung unverändert bliebe, eine Excursion im Intercarpalgelenke verhindern würde.

Das Naviculare befindet sich zwischen den Multangula und dem Radius wie ein nach vorn sich neigender zweiarmiger Hebel eingesetzt, der die Axe für seine Bewegung gegen das Capitatum als Drehaxe hat. In Folge der Belastung an seinem vorderen distalen Ende rotirt nun das Naviculare im Intercarpalgelenke gegen die Gelenkfläche des Capitatum, die nach demselben sieht. Dadurch wird das vordere Ende der Längsaxe des Naviculare gesenkt und das hintere Ende derselben erhoben. Die an der Mittelhand inserirenden, radial abducirenden Muskeln würden beim Zusammenwirken nicht diese Bewegung des Naviculare erzeugen können, wenn nicht das Naviculare in der Sagittalebene gegen die distale Carpalreihe wie gegen den Radius beweglich wäre. Nun kommt diese Bewegung dadurch zu Stande, dass das Naviculare gegen den Radius volar rotirt und gegen die Multangula und das Capitatum dorsal flectirt wird.

Die Bewegung des Naviculare wird nach dem mit demselben verbundenen Lunatum und durch dieses zum Triquetrum fortgepflanzt, welche durch Rotationsflächen gegen die distale Carpalreihe sowohl, wie gegen die Gelenkpfanne des Vorderarmes beweglich sind, so dass sie, wie die Röntgogramme zeigen, gleichzeitig mit der Volarrotation im Radiocarpalgelenke im Intercarpalgelenke dorsal flectirt werden.

Die Form der Gelenkflächen zwischen dem Hamatum und Triquetrum zwingt auch das Triquetrum, gleichzeitig mit der Radialabduction, eine Dorsalflexion gegen das Hamatum auszuführen, welcher von einer entsprechenden Volarflexion im Radiocarpalgelenke das Gegengewicht gehalten wird.

Bei ulnarer Abduction hat die Flexion der proximalen Carpalreihe einen umgekehrten Verlauf. Die Faktoren, welche die Flexion hierbei zu Stande bringen, dürften der am distalen Ende des Naviculare wirkende, nach oben gerichtete Zug und die Schraubenform der Gelenkflächen zwischen dem Triquetrum und Hamatum sein.

4. Welche Rotationsflächen leiten die Abductionsbewegungen im Intercarpal- und Radiocarpalgelenke?

Das Intercarpalgelenk.

Bei der Besprechung der Axenlagen bei den Abductionsbewegungen erwähnte ich, dass die Projection der proximalen ossösen Fläche des Capitatum und der proximale Theil von dessen radialer Fläche eine Kreislinie bilden, deren Mittelpunkt in dem für die Abductionsbewegungen gefundenen Rotationscentrum liegt. Diese Flächen, wie ihnen

entsprechende Flächen am Naviculare und Lunatum, scheinen deshalb die Bewegung der distalen Carpalreihe gegen die proximale zu leiten. Die an dem knorpelbekleideten Knochen markirte Kante zwischen den proximalen und radialen Flächen des Capitatum scheint eine regelmässige Rotation nicht zu hindern.

Die ulnare Gelenkfläche des **Hamatum** hat für ihre Projection auf der Horizontalebene einen grösseren Halbmesser als die Gelenkfläche des Capitatum, so dass deren Mittelpunkt ungefähr im Punkte *X* der Fig. 6 Taf. V liegt. Dadurch wird indess die distale Carpalreihe nicht gehindert, sich um eine durch den Punkt *M* laufende sagittale Axe gegen die proximale Carpalreihe zu bewegen, indem das Triquetrum in proximaler und distaler Richtung gegen das Lunatum beweglich ist.

In Taf. V Fig. 4 ist bis an die Gelenkfläche des Capitatum gegen die proximale Carpalreihe eine (rothe) Kreislinie mit *M* als Mittelpunkt gezogen. Sie ist hier mit den radialen zwei Dritteln der proximalen Contour und dem proximalen Theile der radialen Contour gleichlaufend, während sie die ulnare Ecke der proximalen Gelenkfläche schneidet. In einigen Fällen läuft auch die Contour des ulnaren Theiles der proximalen Gelenkfläche parallel mit einer Kreislinie mit dem Rotationscentrum als Mittelpunkt. In solchen Fällen, wie dem abgebildeten, wo die ulnare Ecke der proximalen Fläche sich unter das Niveau der übrigen Gelenkfläche senkt, dürfte diese Ecke die Leiste an der distalen Gelenkfläche des Lunatum nicht überschreiten. Der von dieser Leiste radialwärts gelegene Theil der distalen Gelenkfläche des Lunatum scheint die Bewegung zwischen dem Capitatum und Lunatum zu leiten, während die von der Leiste ulnarwärts gelegene Facette dazu bestimmt sein dürfte, bei extremer ulnarer Abduction die proximale Kante des Hamatum aufzunehmen.

Das Radiocarpalgelenk.

Hinsichtlich des Radiocarpalgelenkes stossen wir auf grosse Schwierigkeiten, durch die Projectionsbilder der Gelenkflächen zu entscheiden, ob die vereinten Gelenkflächen von Naviculare und Lunatum die Bewegung in diesem Gelenke leiten, oder ob nur eine von den Gelenkflächen dieser Knochen die Bewegung bestimmt. Das **Triquetrum** betreffend ist nicht anzunehmen, dass dieser Knochen, der nur bei ulnarer Abduction mit dem Discus in Berührung und nie mit dem Vorderarm in Knochencontact kommt und in wesentlichem Grade gegen das Lunatum verschiebbar ist, einen leitenden Einfluss auf die Bewegung im Radiocarpalgelenke haben sollte.

Die Projection der proximalen Gelenkfläche des Naviculare entspricht bei allen Momenten der Abductionsbewegung und in allen Fällen in den Theilen, welche mit dem Radius in Contact kommen, bis zu dem Punkte (*e* Taf. V Fig. 4), wo sich die Fläche des Naviculare erhebt, um die Leiste überschreiten zu können, einen Kreisbogen mit dem gefundenen Rotationscentrum für die Abductionsbewegungen des ganzen Gelenksystemes (*M*) als Mittelpunkt.

Die Partien der proximalen Fläche des Naviculare, welche mit diesem Theile der Radiusfläche in Berührung sind, nehmen auf allen Röntgogrammen aus derselben Serie dieselbe Lage zum Radius wie zum Rotationscentrum ein.

Der Theil der proximalen Fläche des Naviculare, der durch dessen gleichzeitige Flexions- und Abductionsbewegung mit dem radialen Theile der Gelenkfläche des Radius in Contact kommt, muss, hieraus zu schliessen, in der Frontal- wie Sagittalebene eine Curvatur mit dem Rotationscentrum der Abductionsbewegungen als Mittelpunkt haben.

Leider ist es nicht möglich gewesen, auf den Röntgogrammen von den Rändern der Hand eine Kenntniss von den Axen für die Flexionsbewegungen des Naviculare zu erhalten, weder bei der während der Abductionsbewegungen auftretenden Flexionsbewegung, noch bei der Dorsovolarflexion der Hand.

Nach den Röntgogrammen zu urtheilen, ist es die Fläche des Naviculare gegen den Radius, welche die Bewegung im Radiocarpalgelenke leitet. Die Curve dagegen, welche von den vereinten Gelenkflächen des Naviculare und Lunatum in den Theilen dieser Flächen gebildet wird, welche mit dem Radius in Contact kommen, hat als Centrum einen Punkt, der mehr distal liegt als *M*.

Wenn es diese ganze Fläche wäre, welche die Bewegung im Radiocarpalgelenke leitete, so würden verschiedene Rotationscentren für die beiden Carpalgelenke existiren, was den von mir oben angeführten Beobachtungen widerspricht. Mehrere übereinstimmende Erscheinungen auf den Röntgogrammen aber, verglichen mit der Form der knorpelbekleideten Gelenkflächen deuten darauf, dass es wirklich nur die proximale Fläche des Naviculare ist, welche die seitliche Rotation im Radiocarpalgelenke leitet.

Auf dem Bilde der Ulnar-Abductionsstellung (Taf. V Fig. 1) bezeichnet der Punkt N^I die ungefähre Lage des Centrums der Curve, welche von der proximalen Contour des Naviculare und Lunatum gebildet wird, so weit sie den Radius berührt. Durch Einpassung der Radiusbilder über einander ist dieser Punkt N_1 in derselben Lage

zum Radius auch auf dem Radial-Abductionsbilde Taf. V Fig. 2 gezeichnet worden. Der Punkt N_2 Taf. V Fig. 2 bezeichnet die ungefähre Lage des Mittelpunktes der von der proximalen Contour des Naviculare-Lunatum gebildeten Curve bei radialer Abductionsstellung. Der Mittelpunkt der von der Contour des Naviculare und Lunatum gebildeten Curve hat, nach diesem zu urtheilen, seine Stellung zum Radius während der Abductionsbewegung nicht beibehalten, sondern sich bei radialer Abduction in radialer Richtung im Verhältniss zum Radius verschoben. Dieser Punkt würde also nicht das Rotationscentrum für das Radiocarpalgelenk bilden können.

Mit vollem Recht lässt sich aber dagegen einwenden, dass es möglich ist, dass der Punkt *N* nicht recht gewählt ist, da dessen Lage schwer zu bestimmen ist nur mit Hülfe der Knochencontour des Naviculare-Lunatum, sondern dass das Rotationscentrum sich an anderer Stelle befinde, distal von *M*, oder dass vielleicht kein festes Rotationscentrum für das Radiocarpalgelenk existire. Es giebt indess weitere Gründe sowohl dafür, dass nicht die gemeinsame Fläche des Naviculare-Lunatum, sondern das Naviculare allein die Bewegung leitet, als dafür, dass ein festes Rotationscentrum existirt.

Es ist möglich, dass der Mittelpunkt der Curve, welche die vereinten Flächen des Naviculare-Lunatum in den Theilen derselben repräsentirt, welche mit dem Radius in Contact kommen, anderswo als im Punkte *N* liegt; wie es aber leicht mit einem Zirkel zu constatiren ist, kann dieser Punkt diesen Flächen nicht näher liegen als *N*.

Nehmen wir dann an, dass *N* das Rotationscentrum (= die Projection der Axe der Rotationsfläche) für das Radiocarpalgelenk bei den Abductionsbewegungen ist, so ist dieses Centrum — unter der Voraussetzung, dass die vereinten Flächen des Naviculare-Lunatum die Bewegung leiten — mit Sicherheit den Gelenkflächen nicht zu nahe gelegt.

Fig. 2 veranschaulicht, wie die Stellung von den Gelenkflächen des Intercarpalgelenkes zum Radius unter dieser Voraussetzung sich bei ulnarer und radialer Abduction, auf die Frontalebene projicirt, in Fall IV*b* gestalten würde. In diesem Falle ist der Ausschlag des ganzen Gelenkes 44°. Der Ausschlag des Intercarpalgelenkes hat sich 35° zu sein erwiesen und ist in gewöhnlicher Weise berechnet (siehe S. 187) unter der Annahme, dass *M* das Rotationscentrum des Intercarpalgelenkes bildet. Der Ausschlag des Radiocarpalgelenkes muss dann 9° betragen. In der Figur bezeichnen *rad.* die Gelenkfläche des Radius und *nl.* die Fläche des Naviculare-Lunatum gegen den Radius. Die Punkte *N* und *M* sind in derselben Entfernung (8^{mm}) von einander wie auf den Röntgogrammen

angebracht. Desgleichen sind die Halbmesser der Gelenkflächen (die Entfernung zur Knochencontour) dieselben wie auf den Röntgogrammen (8 und 28 mm). Die Linie 1 bis I bezeichnet eine gewisse, bei Ulnar-Abductionsstellung der Hand durch das Rotationscentrum des Intercarpalgelenkes gezogene Normale zu *nl*. Die Rotationsfläche des Intercarpalgelenkes (die Rotationsfläche des Capitatum) nimmt nun zum Radius die Lage ct_1 ein. Nach einer Rotation im Radiocarpalgelenk von 9° um den Punkt *N* nimmt die gegebene Normale zur Gelenkfläche des Naviculare-Lunatum die Lage II ein, und die Rotationsflächen des Intercarpalgelenkes werden in die Lage ct_2 versetzt.

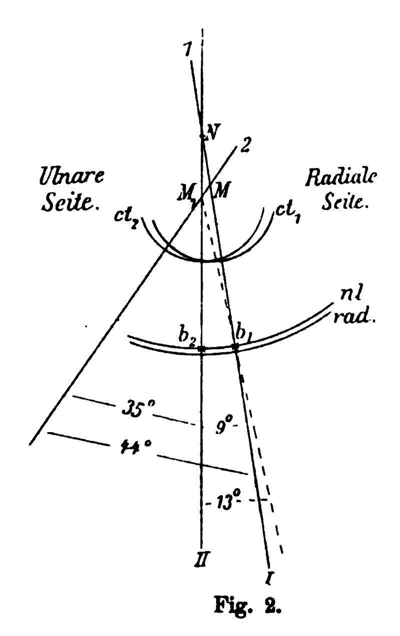


Fig. 2.

Obgleich der Radius während der Bewegung fest bleibt, schneidet das Projectionsbild der Rotationsflächen des Intercarpalgelenkes in Ulnar-Abductionsstellung — unter den nun gegebenen Voraussetzungen — deren Projectionsbild in der Radial-Abductionsstellung, wie die Figur zeigt.

Es ist leicht einzusehen, dass die Projectionen der Rotationsflächen des Intercarpalgelenkes, nur wenn ein gemeinsames Rotationscentrum für beide Gelenke existirt, nach einer Excursion im Radiocarpalgelenk zusammenfallen können; ich habe indess dieses Bild mitgetheilt, um zu zeigen, dass schon bei einem Ausschlage von 9° im Radiocarpalgelenke eine leicht bemerkbare Abweichung zwischen den Projectionen der Gelenkflächen des Intercarpalgelenkes in den beiden Handstellungen eintreten würde, wenn die vereinten Flächen des Naviculare-Lunatum die Bewegung im Radiocarpalgelenk leiteten.

Zum Vergleich hiermit sei Taf. V Fig. 4 mitgetheilt. Dieselbe ist so erhalten, dass die Bilder der Ulnar- und Radial-Abductionsstellung (Taf. V Figg. 1 und 2) in Fall IV *b* über einander angebracht sind, so dass die Contouren der Vorderarmknochen einander decken. Darauf sind beide Bilder in eine Figur gezeichnet. Die Contouren der Ulnar-Abductionsstellung sind mit ausgezogenen Linien, die der Radial-Abductionsstellung mit punktirten Linien gezeichnet. Wo die Contouren

zusammenfallen, sind sie nur durch eine ausgezogene Linie gekennzeichnet. Auf der Figur sieht man, wie gut die Vorderarmknochen ihre Contour bewahrt haben. Hier kann bei der Einpassung kaum eine Ungewissheit in Frage kommen.

Wenn wir nun die Projectionen der Gelenkfläche des Capitatum in den beiden Handstellungen betrachten, so zeigt es sich, dass die Contouren der beiden Projectionsbilder längs einer (zwischen den auf der Figur angebrachten Kreuzen befindlichen) Strecke zusammenfallen, die einer Corda von 8 mm Länge entspricht. Hierdurch werden die vorher gemachten Berechnungen, nach welchen die beiden Carpalgelenke ein gemeinsames Rotationscentrum haben, vollkommen bestätigt. Dessen Lage befindet sich im Centrum der auf den beiden Projectionsbildern des Capitatum gemeinsamen Kreislinie, d. h. im Punkte *M*.

Die zusammenfallenden Partien auf den Projectionsbildern des Capitatum sind: auf dem Radial-Abductionsbilde der proximale Theil der radialen Fläche, auf dem Ulnar-Abductionsbilde die radialen zwei Drittel der proximalen Fläche.

Aus Fig. 2 S. 224 geht auch hervor, welche Differenzen bei Bestimmung der Theilnahme der beiden Gelenke an der Abductionsbewegung entstehen würden, wenn die Ausschläge des Radiocarpalgelenkes vom Punkte *M* aus berechnet würden, die Bewegung factisch aber um eine Axe erfolgte, die durch den Mittelpunkt einer Curve liefe, die von den vereinten Flächen des Naviculare-Lunatum gebildet wird.

Wenn z. B. die Verchiebung des Punktes *b* (Fig. 2) an der proximalen Carpalreihe in Graden berechnet würde, ausgehend von *M* als Rotationscentrum, dann würde man für das Radiocarpalgelenk eine Excursion von 13° erhalten, wenn die wirkliche Bewegung 9° war. Die Summe der Excursionen beider Gelenke würde also von dem gefundenen Ausschlage der Bewegung des ganzen Gelenkes um 4° abweichen. Aus der Fig. 4 Taf. V, verglichen mit den Figg. 1 und 2 auf derselben Tafel ist indes zu ersehen, wie gut die für die beiden Gelenke besonders gefundene Excursion mit der für das ganze Gelenksystem gefundenen Bewegung stimmt.

Die in Fig. 4 Taf. V im Radiocarpalgelenk mit Roth gezogene Kreislinie mit *M* als Mittelpunkt läuft parallel mit der proximalen Fläche des Naviculare in den Theilen, welche den Radius berühren, bis zu dem Punkte, bei welchem sich diese Fläche erhebt, um die Leiste

zu überschreiten, die proximale Contour des Lunatum aber wird von derselben geschnitten, so dass ein keilförmiger Sector des Lunatum, Spitze radialwärts, ausserhalb dieser Kreislinie läuft.

Sehen wir dann nach, ob die Gelenkfläche des Radius eine Form zeigt, welche eine Rotation der proximalen Carpalreihe gegen dieselbe um eine Axe zulässt, welche durch einen Punkt läuft, der so wie das gefundene Rotationscentrum *M* liegt, ohne dass die von einer entsprechenden Bewegungsbahn abweichende proximale Fläche des Lunatum die Bewegung hindert.

Prüft man auf einem Frontalschnitt durch die Mitte der knorpelbekleideten proximalen Gelenkfläche des Radius die auf beiden Seiten der Leiste gelegenen Partien der Gelenkfläche, so ist es deutlich, dass diese je einen verschiedenen Krümmungshalbmesser haben. Der radiale Theil hat einen kürzeren Krümmungshalbmesser als der ulnare, dessen Centrum auch mehr ulnarwärts liegt.

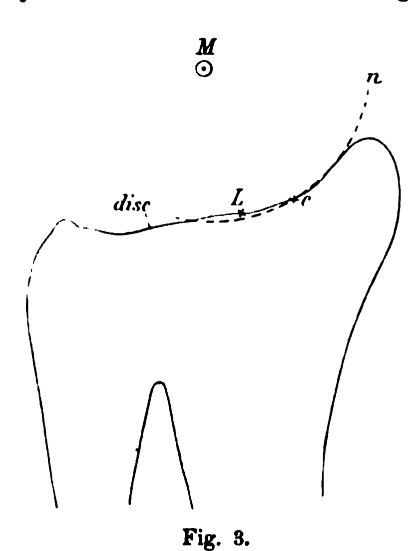


Fig. 3.

Auf der Copie des frontalen Sägeschnittes durch einen knorpelbekleideten Radius (Fig. 3) bezeichnet Punkt *L* den Höhepunkt der Leiste. Punkt *e* giebt die Stelle an, wo die Leiste anfängt, sich über die radiale Abtheilung der Fläche des Radius zu erheben, und die Kreislinie *n* läuft in der Contour des radialen Theiles der Gelenkfläche des Radius, welche eine Kreislinie mit dem Punkte *M* als Mittelpunkt bildet.

Bei Vergleich der Fig. 3 Taf. V und Fig. 3 tritt die Uebereinstimmung zwischen der Contour der Radiusfläche auf dem Frontalschnitt und dem Projectionsbilde auf dem Röntgogramme hervor. Die Lage des Punktes *M* Fig. 3 auf dem Frontalschnitte entspricht auch gut der Lage des auf dem Röntgogramme gefundenen Rotationscentrums für die Abductionsbewegungen (*M* Taf. V Fig. 2).

Der Krümmungshalbmesser für den radialen Theil der Radiusfläche (gerechnet von *M* bis zur Knorpelfläche) ist auf dem Frontalschnitte des Radius (Fig. 3) 21 ^{mm}. In den radiographirten Fällen ist die Entfernung vom Rotationscentrum bis zum radialen Theile

der Gelenkfläche des Radius in Fall I 19 mm, in Fall II 18 mm, in Fall III 21·5 mm, in Fall IV 21 mm, in Fall V 20·5 mm.

Die Kreislinie *n* Fig. 3 S. 226 lässt zwischen sich und dem ulnaren Theile der Gelenkfläche des Radius einen keilförmigen Raum mit der Spitze radialwärts. Nach meinem Dafürhalten entspricht dieser Raum dem keilförmigen Segment des Lunatum, welches ausserhalb der Fortsetzung der Rotationsfläche des Naviculare gegen den Radius (siehe Taf. V Fig. 4) liegt. Die im Radiocarpalgelenke gezogene (rothe) Kreislinie mit *M* als Mittelpunkt schneidet bei Ulnar-Abductionsstellung der Hand die proximale Fläche des Lunatum ungefähr auf der Grenze von dessen radialem Drittel oder etwas mehr radialwärts. Das radiale Drittel (Viertel) der proximalen Fläche des Lunatum kann also auf die Leiste gleiten.

In den übrigen Fällen nimmt auch die proximale Fläche des Lunatum ungefähr dieselbe Stellung zum Naviculare ein. Die Form des Lunatum wechselt indess etwas, so dass die Projection seiner proximalen Fläche eine stärkere Krümmung zeigen kann, als wie wir in dem abgebildeten Falle sehen (so in Fall I, wo die Krümmung der proximalen Contour des Lunatum sich sehr einer Kreislinie mit dem Rotationscentrum als Mittelpunkt nähert). Dabei wird das keilförmige Segment des Lunatum, welches ausserhalb der Bahn des Naviculare gegen den Radius fällt, niedriger, was mit einer entsprechenden stärkeren Krümmung der Gelenkfläche des Radius im Ganzen zusammenhängen dürfte.

Bei extremer ulnarer Abduction steht die proximale Fläche des Lunatum im Ganzen oder bis auf wenige Millimeter von deren ulnarer Kante mit der ulnaren Abtheilung der Gelenkfläche des Radius im Contact.

Bei der Streckstellung der Hand steht die proximale Fläche von ungefähr dem halben Lunatum über dem Radius, und bei radialer Abduction befindet sich nur das radiale Drittel — etwas mehr oder etwas weniger in ungleichen Fällen — über dem Radius.

Obgleich die proximale Carpalreihe, wie gezeigt worden, sich gegen den Radius längs einer Bahn bewegt, die nicht in der Frontalebene mit der Krümmung der proximalen Fläche des Lunatum und der ulnaren Abtheilung der distalen Fläche des Radius zusammenfällt, behält doch das Lunatum, wie die Röntgogramme zeigen, während der Bewegung von ulnarer zu radialer Abduction mit dem Radius Contact. Wenn die Entfernung vom Rotationscentrum zur Contactfläche des

Lunatum mit dem Radius während der Abductionsbewegung unverändert bliebe, wäre dies eine Unmöglichkeit, weil zufolge der Rotation der proximalen Carpalreihe bei radialer Abduction von der Ulnar-Abductionsstellung aus, das Lunatum vom Radius abgehoben würde.

Durch die mit der Radialabduction gleichzeitige Flexion des Lunatum zwischen dem Radius und dem Capitatum wird aber die Höhe der zwischen Radius und Capitatum befindlichen Partie des Lunatum vergrössert, so dass das Lunatum fortfahrend Contact mit dem Radius behält.

Aus den Röntgogrammen von den Dorsal- und Volarflexionsstellungen der Hand geht hervor, dass die Dorso-Volarflexion zwischen dem Capitatum und Lunatum um eine Axe ausgeführt wird, die durch das Capitulum Capitati in gleicher Höhe mit der Axe für die Abductionsbewegungen läuft und also diese Axe schneidet. Die distale Fläche des Lunatum bleibt deshalb trotz der Dorso-Volarflexion während der Abductionsbewegungen in derselben Entfernung von der Axe für die Abductionsbewegungen. Die Entfernung zwischen der distalen und proximalen Fläche des Lunatum ist indess verschieden längs jeder Normalen der vorigen Fläche, weshalb bei Rotirung das Lunatum in dorsovolarer Richtung zwischen dem Capitatum und Radius die Entfernung von der Axe für die Abductionsbewegungen zu der Contactfläche des Lunatum mit dem Radius in jedem Moment der Bewegung verschieden ist.

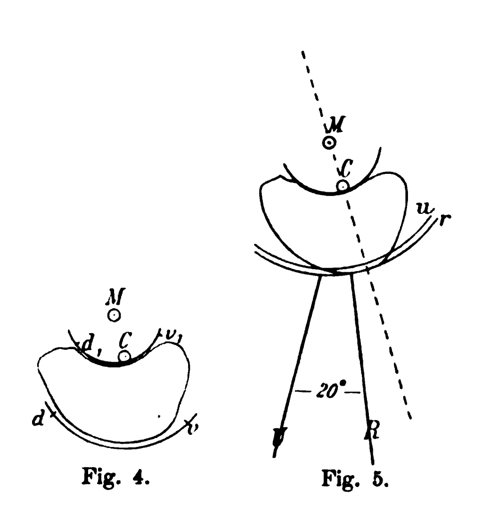


Fig. 4. Fig. 5.

Wie aus den Röntgogrammen hervorgeht (S. 240), bewegt sich das Lunatum gegen den Radius in der Sagittalebene um eine Axe, die in gleicher Höhe mit dem tiefsten Theile der distalen Fläche des Lunatum verläuft. Die Figg. 4 und 5 zeigen Copien eines Sagittalschnittes durch einen Gipsabguss von einem knorpelbekleideten Lunatum in dessen radialem Theil. Der Punkt *M* ist der Mittelpunkt für die Krümmung der distalen Gelenkfläche in der Sagittalebene, und der Punkt *C* ist das Centrum für den mittelsten, grösseren Theil der Krümmung der proximalen Gelenkfläche in der Sagittalebene. Siehe Fig. 4, wo die Kreislinie *d—v* mit *C* als Mittel-

punkt und die Kreislinie $d_1 - v_1$ mit *M* als Mittelpunkt gezogen ist! Die Entfernung zwischen den distalen und proximalen Flächen des Lunatum ist in einer Partie des volaren Theiles des Lunatum am grössten und nimmt von da sowohl volar- wie dorsalwärts ab.

In Fig. 5 sind die Linien *U* und *R* durch zwei Punkte auf der proximalen Fläche des Lunatum gezogen, welche sich 20° von einander entfernt befinden, gerechnet vom Punkte *C* — die Volarflexion des Lunatum gegen den Radius bei Radialabduction ist in dem untersuchten Falle etwa 20°.

Die Kreislinien *u* und *r* sind, mit *M* als Mittelpunkt, durch die Schneidepunkte der Linien *U* und *R* auf der proximalen Fläche des Lunatum gezogen. Die Entfernung zwischen den Kreislinien *u* und *r* (= 1 mm) giebt den Unterschied zwischen der Entfernung dieser Punkte von *M* an, das in gleicher Höhe mit der Axe für die Abductionsbewegungen liegt.

Bei ulnarer Abduction (Taf. VI Figg. 8 und 10) ist nun das Lunatum dorsal gegen den Radius flectirt, und dessen niedrige, dorsale Partie befindet sich zwischen dem Capitatum und Radius.

Bei radialer Abduction (Taf. VI Figg. 9 und 11) rotirt das Lunatum in volarer Richtung zwischen dem Capitatum und dem Radius, so dass immer höhere Partien desselben zwischen diese Knochen eingeschoben werden, denn die Volarflexion wird nicht so weit getrieben, dass die vorderste niedrigere Partie des Lunatum zwischen das Capitatum und den Radius geschoben wird, wie aus den Figuren hervorgeht.

Gleichzeitig, dass das Lunatum durch die radiale Abduction vom Radius abgehoben wird, gleitet es durch die Volarrotation gegen den Radius wie ein Keil von vorn zwischen das Capitatum und den Radius ein und behält auf diese Weise den Contact mit beiden bei.

Auf den Röntgogrammen bemerkt man die bei radialer Abduction gesteigerte Höhe der zwischen dem Capitatum und Radius befindlichen Partie des Lunatum durch eine Zunahme in der Höhe des Projectionsbildes.

Die Entfernung der proximalen Fläche des Capitatum zur proximalen Fläche des Lunatum ist in sämmtlichen Fällen auf dem Radialabductionsbilde 1 bis 1·5 mm grösser als auf dem Ulnarabductionsbilde. Dies tritt in Fig. 4 Taf. V hervor, wo das Radial- und Ulnarabductionsbild über einander gezeichnet sind, so dass die Contouren des Radius zusammenfallen. Die proximale, radiale Ecke des Lunatum erhebt sich bei der Ulnarabductionsstellung 2 mm über die im

Radiocarpalgelenke — mit dem Rotationscentrum *M* als Mittelpunkt — roth gezogene Kreislinie. Bei der Radialabductionsstellung steht diese Ecke nur $^3/_4$ mm über der Kreislinie. Ferner sieht man, wie durch die Zunahme der Höhe des Lunatumkörpers bei radialer Abduction der Contact mit dem Radius bewahrt wird, indem der radiale Theil der proximalen Fläche des Lunatum gegen den Theil der Gelenkfläche des Radius ruht, der bei der ulnaren Abduction von dem mittelsten Theile der proximalen Fläche des Lunatum eingenommen wurde. In Taf. V Fig. 7, wo die Bilder des Lunatum bei ulnarer und radialer Abduction der Hand über einander eingestellt sind, so dass die Seitencontouren zusammenfallen und die Rotationscentra *M* über einander stehen, ist auch die grössere Höhe des Lunatumkörpers bei der radialen Abduction zu sehen.

Dadurch, dass die radiale Fläche des Lunatum nicht in die Sagittalebene gestellt ist, sondern deren proximale Kante schräg von hinten und von ulnarer Seite, nach vorn und in radialer Richtung verläuft, wird durch die, mit der radialen Abduction gleichzeitige, Volarflexion des Lunatum gegen den Radius dessen Contactfläche mit dem Radius radialwärts ein wenig verlängert. Dies giebt sich nicht auf den Röntgogrammen zu erkennen, da die Breitenprojection des Lunatum hierdurch nicht vergrössert wird.

Alle die nun angeführten Facta deuten darauf, dass die Bewegung im Radiocarpalgelenk von der radialen Abtheilung der distalen Gelenkfläche des Radius und den Theilen der proximalen Fläche des Naviculare geleitet wird, die mit derselben in Contact kommen.

Die Leiste auf der Gelenkfläche des Radius erhebt sich über die für die Abductionsbewegungen bestimmende radiale Rotationsfläche des Radius, und die ulnarwärts von der Leiste liegende Abtheilung der distalen Gelenkfläche des Radius senkt sich unter diese Rotationsfläche.

In Folge davon, dass sowohl die Contactfläche des Lunatum als die des ulnaren Theiles des Naviculare mit dem Radius während der Abductionsbewegung durch die gleichzeitige Rotation der proximalen Carpalreihe in der Sagittalebene die Form verändern, wird es der proximalen Carpalreihe möglich, unter beibehaltenem Contact mit sowohl der ulnaren als radialen Abtheilung der Gelenkfläche des Radius gegen den Carpus, bei den Abductionsbewegungen der Hand um eine durch das Centrum des Capitulum Capitati laufende feste, sagittale Axe zu rotiren.

Die dorso-volare Rotation der proximalen Carpalreihe zwischen der distalen Carpalreihe und dem Radius ist also von Bedeutung, und zwar nicht nur, um die Randpartien der Gelenkpfanne des Intercarpalgelenkes zu senken und so die Beweglichkeit in diesem Gelenke zu vermehren, sondern auch dadurch, dass sie eine allmähliche Formveränderung von dem Gelenkkopfe des Radiocarpalgelenkes bewirkt, wodurch dieses Gelenk, trotz der unregelmässigen Form der Gelenkflächen, bei den Abductionsbewegungen functionirt, als ob die gesammten Gelenkflächen exacte Rotationsflächen bildeten.

IV. Volar- und Dorsalflexion der Hand.

1. Flächenansichten von der Dorsal- und der Volarflexionsstellung der Hand.

Taf. VI Fig. 12 zeigt eine rechte Hand in Dorsalflexion, gesehen von volarer Seite (diese Seite nach der Platte). Das Bild ist umgekehrt, so dass es aussieht wie eine linke Hand, um den Vergleich mit der folgenden Figur zu erleichtern. Taf. VI Fig. 13 giebt dieselbe Hand in Volarflexion wieder, gesehen von der dorsalen Seite. Diese rechte Hand ist die derselben Person, deren linke Hand bei der Schilderung der Abductionsbewegungen unter der Benennung Fall IV wiedergegeben ist (Taf. V Figg. 1 bis 3). Die Röntgogramme sind in der Weise aufgenommen, wie auf Seite 171 angegeben wurde. Ein directer Vergleich der Detailveränderungen Seitens der Contour der Knochen, um daraus auf kleinere Bewegungen zwischen den einzelnen Knochen zu schliessen, lässt sich hier natürlich nicht machen. Diese Röntgogramme aber können über die Stellung der ganzen Carpalreihen unter einander in der Frontalebene bei der Dorsal- und der Volarflexionsstellung der Hand Aufklärung geben. Bei der Radiographirung der Dorsalflexionsstellung (Taf. VI Fig. 12) ist die gesammte Hand etwas mehr ulnar abducirt gewesen als bei der Aufnahme des Volarflexionsbildes (Taf. VI Fig. 13). Dies giebt sich dadurch zu erkennen, dass die Mittelhandknochen auf dem Dorsalflexionsbilde grössere Neigung nach der ulnaren Seite haben als auf dem Volarflexionsbilde. Diese ulnare Abduction der Hand ist durch eine Rotation im Radiocarpal- und Intercarpalgelenke zu Stande gekommen. Wir sehen, wie z. B. das Lunatum sich ein wenig radialwärts gegen den Radius und das Capitatum sich radialwärts gegen das Lunatum verschoben hat. Die

beiden Carpalreihen haben sich in derselben Richtung bewegt, und diese Bewegung giebt sich durch eine Bewegung der ganzen Hand zu erkennen. Eine durch die Hauptbewegung der Hand — die Dorso-Volarflexion — verursachte seitliche Mitbewegung zwischen den Carpalreihen, welche von einer entgegengesetzten Bewegung zwischen der proximalen Carpalreihe und dem Radius compensirt werden sollte, tritt auf den Röntgogrammen von der Dorsal- und Volarflexionsstellung der Hand, aufgenommen in sagittaler Richtung, nicht hervor.

Noch eine Hand habe ich mit gleicher Anordnung und übereinstimmendem Resultat röntgographirt.

2. Randbilder von den Volar- und Dorsalflexionsstellungen der Hand.

Die distale Carpalreihe.

Ob in der distalen Carpalreihe eine Bewegung zwischen den einzelnen Knochen von der Dorso-Volarflexion hervorgerufen wird, ist nach meinen Röntgogrammen nicht zu entscheiden möglich. Die Flächenansichten sind nicht gleichförmig genug radiographirt, als dass man irgend welche diesbezügliche Schlüsse ziehen könnte, und auf den Randbildern treten die Knochen der distalen Carpalreihe nicht mit genügend distincten Contouren hervor, um nach diesen Bildern ein Urtheil fällen zu können. Diese Frage lasse ich also offen.

Die proximale Carpalreihe.

Ueber die proximale Carpalreihe geben vor Allem die ulnaren Randbilder (Taf. VII Figg. 14 bis 16) eine Reihe von Aufschlüssen. Da ich nur von einem Falle anwendbare Röntgogramme von der ulnaren Seite der Hand bei ihrer Dorsal- und Volarflexion habe, und also nicht durch Vergleiche die Bilder der ulnarwärts liegenden Knochen controliren kann, will ich versuchen, die Bedeutung der eintretenden Contourveränderungen etwas näher zu erörtern.

Bei dem Studium dieser Bilder ist dann zu merken, dass die Vorderarmknochen auf den Röntgogrammen von dem Volar- und dem Dorsalflexionsbilde der Hand ihre gegenseitige Lage behalten und auch beide Projectionsbilder gegeben haben, welche auf den beiden Bildern, mit sehr geringen Abweichungen auf kleineren Partien der

Contour, zusammenfallen. In Taf. VII Fig. 20 sind die Contouren der Vorderarmknochen auf dem Volar- und dem Dorsalflexionsbilde über einander gezeichnet. Die Contouren der Vorderarmknochen auf dem Volarflexionsbilde sind mit ganz ausgezogenen Linien, auf dem Dorsalflexionsbilde dagegen mit punktirten bezeichnet. Die Veränderungen, welche die Contouren der Vorderarmknochen erlitten haben, und die in Taf. VII Fig. 20 zu sehen sind, deuten auf eine Rotation des Vorderarmes in supinatorischer Richtung beim Uebergehen der Hand von Dorsal- zu Volarflexion. — Mit einem Skelettpräparat des Vorderarmes kann man sich leicht überzeugen, welche merkbare Veränderung der Projectionsbilder der Vorderarmknochen selbst die geringste Rotation zwischen den Vorderarmknochen oder Rollung des Armes bei der Armstellung hervorruft, die bei dieser Radiographirung benutzt worden ist. Es muss daher eine sehr unbedeutende Rollung des Vorderarmes sein, die eine so geringe Contourveränderung der Vorderararmknochen bewirkt hat.

Stellt man die Bilder des Capitatum über einander ein, so fallen die Contouren der proximalen Gelenkfläche zusammen. Der distale Theil der dorsalen Contour auf dem einen Bilde fällt ebenfalls über die entsprechende Contour auf dem anderen Bilde, desgleichen die dorsale Contour des mit dem Capitatum vereinten Metacarpale III (met. III Taf. VII Figg. 14 und 16). Auf dem proximalen Theile der dorsalen Partie des Capitatum aber laufen die Contouren aus einander, so dass die Contour auf dem Dorsalflexionsbilde auf der Stelle, wo die Linien am weitesten geschieden sind, 1 ^{mm} weiter dorsalwärts liegt als auf dem Volarflexionsbilde. Die Contouren laufen an der Grenze der proximalen Gelenkfläche und im distalen Theile der dorsalen Contour des Capitatum wieder zusammen. Die Partien der volaren Contour des Capitatum, welche hervortreten, fallen zusammen.

In Taf. VII Fig. 20 sind die Bilder des Lunatum bei der Dorsalflexionsstellung (gezeichnet mit punktirten Linien) und bei der Volarflexionsstellung (gezeichnet mit ausgezogenen Linien) über einander eingepasst. Auf den beiden Projectionsbildern des Lunatum fallen, wie zu sehen, die volaren und proximalen Contouren, wie der dorsale Theil der Contour der distalen Gelenkfläche zusammen. Mit Hülfe dieser Contouren sind im Folgenden analoge Punkte auf den beiden Projectionsbildern des Lunatum bestimmt. Der dorsale Theil der Contour der proximalen Gelenkfläche ist nicht auf beiden Bildern gleich, indem auf dem Dorsalflexionsbilde diese Contour dorsalwärts von der entsprechenden Contour auf dem Volarflexionsbilde fällt, die grösste Entfernung zwischen

ihnen ist etwa 1 mm. Die dorsale Contour des Lunatum ist auf den Röntgogrammen sehr schwer zu finden, denn auf dem Gebiete, wo sie zu suchen ist, laufen die Contouren von Lunatum, Naviculare und Triquetrum zusammen. Eine in ihrer ganzen Ausdehnung deutliche Contour von der dorsalen Fläche des Lunatum ist nicht zu finden. Es sind zwei stellenweise hervortretende Contouren zu sehen, die am dorsalen Rande der distalen Gelenkfläche des Lunatum zusammenlaufen. Möglicher Weise repräsentiren sie den ulnaren und radialen Rand der dorsalen Fläche des Lunatum. Vielleicht bildet die eine von ihnen den dorsalen Theil der proximalen Contour des Naviculare. Bei Einstellung der beiden Projectionsbilder des Lunatum über einander mit Hülfe der proximo-volaren Contour verlaufen eben erwähnte Contouren in der Nähe des dorsalen Randes des Lunatumbildes auf dem einen Bilde über die entsprechenden Contouren auf dem anderen Bilde.

Der vordere Theil von der Contour der distalen Gelenkfläche des Lunatum liegt auf dem Dorsalflexionsbilde etwas tiefer als auf dem Volarflexionsbilde. Da die Contouren sonst gut übereinstimmen, dürfte die Contour, welche auf dem ersteren Bilde hervortritt, nicht der auf dem letzteren Bilde sichtbaren entsprechen, sondern es repräsentirt wahrscheinlich die in Frage stehende Contour auf dem Volarflexionsbilde eine Projection der distalen Gelenkfläche des Lunatum, während auf dem Dorsalflexionsbilde die ulnare Kante der distalen Gelenkfläche hervortritt, die in der nicht abducirten Hand tiefer als die Gelenkfläche sonst steht.

Dass ich auf den Röntgogrammen die Contouren des Capitatum und des Lunatum wiedergefunden und deren betreffende Bilder auf den Röntgogrammen richtig über einander eingestellt habe, wird indirect dadurch dargethan, dass es gelungen ist, auf den Röntgogrammen einen während der Bewegung zwischen dem Capitatum und dem Lunatum auf den Projectionsbildern unverrückten Punkt und ebenso einen bei der Rotation des Lunatum gegen den Radius im Verhältniss zu den Projectionsbildern der beiden Knochen unbeweglichen Punkt zu finden.

Sowohl die Veränderungen, welche das Bild des Capitatum durchgemacht, als die Verschiedenheiten in den beiden Bildern des Lunatum deuten eine Rotation der Hand in supinatorischer Richtung bei dem Uebergange von dorsaler zu volarer Flexion an. Durch Contourveränderungen, welche auf den in den Randpartien der Hand liegenden Knochen eingetreten sind, giebt sich auch eine solche Bewegung zu erkennen.

Bei einer Einstellung der Capitatumbilder auf den beiden Röntgo-

grammen (Taf. VII Figg. 14 und 16) über einander, wenn auch die dorsalen Contouren des dritten Metacarpalknochens zusammenfallen — die volare tritt nicht hervor —, verläuft die volare Contour des zweiten Metacarpalknochens (met. II Taf. VII Figg. 14 und 16) auf dem Volarflexionsbilde parallel mit der entsprechenden Contour auf dem Dorsalflexionsbilde, ist aber 4 mm näher dem volaren Rande des Capitatum (in dorsaler Richtung) verschoben. Der volare Rand des Hamulus Hamati ist dagegen auf dem Volarflexionsbilde 3 mm weiter ab (mehr volarwärts) vom Capitatum projicirt, und die dorsale Contour des Hamatum hat sich der dorsalen Contour des Capitatum 3 mm näher (mehr volarwärts) als auf dem Dorsalflexionsbilde gerückt.

Beim Uebergehen der Hand von dorsaler zu volarer Flexion hat sich also die ulnare Kante der Handwurzel auf den Röntgogrammen 3 mm volarwärts, deren radiale Kante 4 mm dorsalwärts im Verhältniss zur Längsaxe (Capitatum und Metacarpale III) der Hand verschoben. Hieraus geht hervor, dass die Hand beim Uebergehen von dorsaler zu volarer Flexion in supinatorischer Richtung rotirt hat.

Auf der proximalen Carpalreihe zeigt sich ein gleichbedeutendes Phänomen. Die Contouren der vereinten Triquetrum-Pisiforme sind im Verhältniss zum Lunatum bei der Volarflexion 3 mm weiter volarwärts projicirt worden als bei der Dorsalflexion. Man vergleiche auf Taf. VII Fig. 14 und Fig. 16 die Entfernung von der volaren Contour des Triquetrum bis zum Punkte *C* auf dem Lunatum! Die Längsaxe des Triquetrum hat dieselbe Neigung zur volaren Contour des Lunatum beibehalten. Die Verschiebung ihres Projectionsbildes beruht folglich nicht auf einer Rotation in volarer Richtung Seitens des Triquetrum gegen das Lunatum, sondern bestätigt, dass die Hand, wie aus der Verschiebung der Seitencontouren der distalen Carpalreihe hervorgeht, beim Uebergehen von dorsaler zu volarer Flexion in supinatorischer Richtung rotirt hat. Die dorso-volare Verschiebung der Contour des Naviculare in Folge dieser Rollung lässt sich auf den Röntgogrammen nicht berechnen, weil das Naviculare, wie näher beschrieben werden soll, in der Sagittalebene gegen das Lunatum rotirt ist.

In Folge der eintretenden Vergrösserung zeigen sich die Contourverschiebungen auf den Röntgenbildern grösser, als sie sich auf einer rechtwinkeligen Projection zeigen sollten. Das Metacarpale II befand sich bei der Radiographirung in ungefähr 7 cm Entfernung von der Platte. Der Abstand der Antikathode zur Platte war 40 cm. Die Verschiebung des Metacarpale II im Verhältniss zur Längsaxe der Hand,

die auf den Röntgogrammen 4^{mm} zu sein scheint, würde auf einer orthogonalen Projection $3 \cdot 3^{mm}$ betragen. Die Entfernung vom Hamulus Hamati zur Platte war ungefähr 3^{cm}. Auf einer rechtwinkeligen Projection würde die Verschiebung seiner Contour wenig geringer als auf den Röntgogrammen gewesen sein, nämlich $2 \cdot 8^{mm}$ betragen. Es muss eine äusserst geringe Rollung der Hand sein, welche auf einer Projection in der Sagittalebene die Ränder der Handwurzel nur etwa 3^{mm} verschiebt. Dass die Projectionen des Capitatum und des Lunatum, trotz einer zwar geringen Rollung, so unbedeutende Veränderungen erleiden, dürfte theils durch deren Lage in der Mitte der Handwurzel, theils durch deren Form zu erklären sein.

Es ist schwer, um nicht zu sagen unmöglich, zu entscheiden, ob die Rollung der Hand nur durch die Rollung des Vorderarmes entstanden ist, oder ob daneben eine Rotation im Handgelenke stattgefunden hat. — Die von der Hand um eine Längsaxe ausgeführte Rotation hat indess Projectionsveränderungen der proximalen wie der distalen Carpalreihe hervorgerufen, welche also beide rotirt haben. Ob beide in gleich hohem Grade rotirt haben, oder ob auch zwischen den beiden Carpalreihen eine Rotation stattgefunden, ist durch die Röntgogramme sicher zu entscheiden nicht möglich, da aber die Verschiebung des Hamulus Hamati im Verhältniss zum Capitatum und die Verschiebung des Triquetrum gegen das Lunatum auf den Röntgogrammen ungefähr gleich gross ist, darf indess angenommen werden, dass, sofern eine Rotation zwischen der Hand und dem Vorderarm stattgefunden, diese Rotation, zum grössten Theil wenigstens, im Radiocarpalgelenk ausgeführt worden ist.

Ich habe mich bei den Veränderungen auf den Röntgenbildern, welche zusammengestellt eine Rotation der ganzen Hand angeben, länger aufgehalten, damit bei der Prüfung der Bewegung der einzelnen Knochen gegen einander die durch die Rollung der ganzen Hand verursachten Veränderungen in der Lage der Knochen auf dem Röntgenbilde keine falsche Auffassung von deren gegenseitigen Stellungsveränderungen bringen werden.

Das Triquetrum. Die Verschiebung der Contour des Triquetrum in dorso-volarer Richtung im Verhältniss zum Lunatum beim Uebergehen der Hand von dorsaler zu volarer Flexion ist, wie gezeigt, vermuthlich durch eine Rotation der ganzen Hand hervorgerufen. Ob ausserdem eine kleine Bewegung zwischen dem Triquetrum und dem Lunatum in dieser oder in entgegengesetzter Richtung stattfindet, welche Verschiebung durch die von der Rollung der Hand verursachte Contourverschiebung verdeckt wird, ist nicht zu entscheiden möglich.

Das Triquetrum scheint in demselben Grade wie das Lunatum an der Flexionsbewegung Theil zu nehmen. Eine Bewegung um eine frontale Axe scheint also zwischen diesen Knochen nicht vorzukommen. Sowohl in Streckstellung, wie Volar- und Dorsalflexionsstellung behält nämlich die volare Contour des Triquetrum dieselbe Neigung gegen die auf den Projectionsbildern des Lunatum analog gelegten Linien I (Taf. VII Fig. 14), II (Taf. VII Fig. 15) und III (Taf. VII Fig. 16).

Aus dem, was H. Virchow auf Skelettgefrierpräparaten und Röntgenbildern dargethan, wissen wir, dass das Triquetrum nur mit der volaren, in sagittaler Richtung concaven, Facette ihrer distalen Fläche mit der entsprechenden Fläche auf dem Hamatum in Berührung kommt, während sich ein Spalt zwischen der dorsalen Facette des Triquetrum und dem Hamatum vorfindet. Ferner befinden sich die volaren Kanten der beiden Knochen erst bei extremer ulnarer Abduction im Contact mit einander, und erst bei dieser Stellung ist der ulnarste Theil der Gelenkfläche des Hamatum im Contact mit dem Triquetrum. Bei radialer Abduction steht die distale Hälfte der ulnaren Gelenkfläche des Hamatum vom Triquetrum unbedeckt, und zwischen den dorsalen Partien der Gelenkflächen befindet sich ein ulnarwärts weiter werdender Zwischenraum.

Dadurch, dass das Triquetrum und das Hamatum, wenn die Hand in die Frontalebene eingestellt ist, nur mittels ihrer volaren Facetten im Contact sind, wird zwischen diesen Knochen eine Rotation in sagittaler Richtung möglich, welche in dorsaler Richtung ausführbar ist, bis der Contact der dorsalen Facetten (Kanten) dieselbe verhindert. Bei radialer Abduction der Hand dürfte die Beweglichkeit in sagittaler Richtung zwischen dem Hamatum und dem Triquetrum am grössten sein, weil die in sagittaler Richtung convexe Facette im proximalen (radialen) Theile der ulnaren Fläche des Hamatum fast die ganze Breite der Fläche einnimmt und ulnarwärts continuirlich schmäler wird. Mit zunehmender ulnarer Abduction dürfte die Bewegung in sagittaler Richtung zwischen dem Hamatum und dem Triquetrum in erhöhtem Grade begrenzt werden, da durch die ulnare Abduction sowohl die volaren Kanten, als der distale Theil der dorsalen Kanten einander sich immer mehr nähern, obgleich die dorsalen Facetten fortwährend klaffen.

Das Pisiforme. Prüft man die Lage des Pisiforme zur volaren Contour des Triquetrum, so zeigt es sich, dass das Pisiforme bei der Volarflexionsstellung der Hand (Taf. VII Fig. 14) sich ungefähr 6 mm mehr proximalwärts auf der volaren Contour des Triquetrum befindet, als bei der Dorsalflexionsstellung (Taf. VII Fig. 16). Aus einem Vergleich mit dem Streckstellungsbilde (Taf. VII Fig. 15) geht hervor,

dass eine Verschiebung von ungefähr 4 mm bei der Volarflexion stattgefunden hat, während bei der Dorsalflexion die Verschiebung zwischen den Bildern des Pisiforme und Triquetrum nur etwa 2 mm gewesen ist.

Hieraus kann man schliessen, dass das Pisiforme bei Volarflexion der Hand in proximaler Richtung gegen das Triquetrum gleitet, bei dorsaler Flexion in distaler Richtung.

Der Winkel zwischen der distalen Contour des Pisiforme und der volaren Contour des Triquetrum ist nicht merkbar verändert. Eine Veranlassung, in Folge der Röntgogramme eine Abhebelung der Gelenkfläche des Pisiforme von der des Triquetrum anzunehmen, giebt es folglich nicht.

Dadurch, dass das Pisiforme in proximaler Richtung gegen das Triquetrum gleitet, wirkt der Musc. flex. carp. ulnaris sowohl auf die distale, als die proximale Carpalreihe direct flectirend. Die Gelenkflächen zwischen dem Pisiforme und dem Triquetrum stehen bei Streckstellung der Hand (Taf. VII Fig. 15) in schwacher Neigung nach der volaren Seite. Der Musc. flex. carp. ulnaris greift also das Pisiforme nicht nur in der Richtung der Gelenkfläche an, längs welcher das Pisiforme gleitet, sondern wirkt auch flectirend auf das Triquetrum, in steigendem Grade bei erhöhter Neigung des Triquetrum.

Die Beweglichkeit des Pisiforme gegen das Triquetrum ist bei Dorsal- und Volarflexion — ebenso als bei den Abductionsbewegungen — auch dadurch von Bedeutung, dass die Nachgiebigkeit in der Verbindung zwischen der distalen und der proximalen Carpalreihe vergrössert wird, wie auch dadurch, dass das Lig. piso-hamatum bei der Volarflexion gespannt wird.

Der Musc. flex. carpi ulnaris wirkt bei der Volarflexion, wie bei der ulnaren Abduction, als ob dessen Sehne vor der Insertion am Hamulus Hamati durch einen am Triquetrum, an der Stelle der Gelenkfläche gegen das Pisiforme, angebrachten Sehnenring passirte, in welchem das Pisiforme, eingefügt in die Muskelsehne, gleitet.

Das Naviculare. Auf den Bildern von der radialen Seite der Hand — diese Seite gegen die Platte — (Taf. VII Figg. 17 bis 19) tritt das Naviculare auf dem Streckstellungsbilde mit seiner ganzen Contour hervor. Auf dem Volarflexionsbilde ist auch das Naviculare sichtbar bis auf den dorsalen Theil der Projection der proximalen Gelenkfläche. Auf dem Dorsalflexionsbilde markirt sich dagegen nur der distale Theil des Naviculare ungefähr bis zur Grenze der proximalen Gelenkfläche.

Auf den Röntgogrammen der ulnaren Handseite (Taf. VII Fig. 14

und Fig. 16) zeigen sich das Projectionsbild der distalen Gelenkfläche des Naviculare wie deren volare Contour, und der volare Theil der proximalen Contour.

In beiden Fällen ist ein hinreichend grosser Theil des Naviculare sichtbar, um eine Vorstellung von dessen Bewegung im Verhältniss zu den übrigen Knochen der Handwurzel und dem Vorderarm zu geben.

Betrachten wir dann erst die Lage des Naviculare zum Lunatum bei volarer Flexionsstellung der Hand (Taf. VII Fig. 14 und Fig. 17), so sehen wir, wie die volare Contour des Naviculare unter einem ziemlich grossen Winkel die volare Contour des Lunatum kreuzt, während auf den Dorsalflexionsbildern (Taf. VII Fig. 16 und Fig. 19) die volare Contour des Naviculare ungefähr in derselben Richtung wie die volare Contour des Lunatum steht.

Auch durch Vergleich der Stellung der distalen und dorsalen Contouren des Naviculare zum Lunatum bei der Dorsal- und Volarflexion der Hand wird es deutlich, dass das Naviculare während der Dorso-Volarflexion der Hand gegen das Lunatum in der Richtung der Bewegung der Hand rotirt wird.

Aus einem Vergleich zwischen den Streckstellungsbildern und den Dorsal- wie Volarflexionsbildern geht hervor, dass in beiden Fällen eine Bewegung zwischen dem Naviculare und dem Lunatum sowohl bei Volar- als Dorsalflexion der Hand stattfindet.

Es ist in hohem Grade überraschend, eine so grosse Bewegung zwischen dem Naviculare und dem Lunatum zu finden, es giebt aber doch keinen Grund anzunehmen, dass die übereinstimmenden Bilder der Röntgogramme darum irreführen.

Das Naviculare zeigt auch eine entsprechende kleinere Bewegung im Verhältniss zur distalen Carpalreihe und eine grössere Bewegung gegen den Radius als das Lunatum.

Eine exacte Rotation der proximalen Fläche der Multangula gegen die distale Gelenkfläche des Naviculare, wodurch die Multangula sich in sagittaler Richtung gegen das Naviculare verschieben würden, scheint nicht vorzukommen, sondern die Bewegung zwischen den Multangula und dem Naviculare scheint, wie bei der Flexionsbewegung während der Abduction der Hand, dadurch zu Stande zu kommen, dass bei der Rotation des Capitatum gegen das Naviculare in volarer Richtung der dorsale Theil der proximalen Fläche der Multangula von der Gelenkfläche des Naviculare gegen dieselben abgehebelt wird (siehe Taf. VII Fig. 17), und bei Rotation des Capitatum dorsalwärts gegen das Naviculare eine Zusammenführung der gegen einander gerichteten Gelenkflächen der

Multangula und des Naviculare stattfindet, so dass der bei Streckstellung der Hand nach hinten klaffende Zwischenraum dieser Flächen geschlossen wird. Man vergleiche auf Taf. VII Figg. 17 bis 19 die Entfernung von der dorsalen Contour des Naviculare bis zur proximalen Contour des Multangulum minus! Möglicher Weise findet auch zwischen den vorderen Partien der Gelenkflächen des Naviculare und des Multangulum majus eine Abhebelung statt (vergleiche auf der Taf. VII Figg. 17 und 19).

3. Die Projectionen auf den Röntgogrammen von den Axen der Dorsal- und Volarflexionsbewegungen.

In keinem der beiden Fälle, in denen es mir gelungen ist, gut dechiffrirbare Röntgogramme von den Dorsal- und Volarflexionsstellungen der Hand zu erhalten, hat eine mit der Flexionsbewegung gleichzeitige Rollung von Arm und Hand vollständig vermieden werden können. In Fall IV ist indess diese Rollung von so geringem Umfange, dass sowohl die Vorderarmknochen, als das Capitatum und das Lunatum, mit nur geringeren Abweichungen auf kleineren Partien der Contour, congruente Bilder auf den Röntgogrammen von der Dorsal- und Volarflexionsstellung der Hand gegeben haben. Ich habe deshalb versucht, ob auf diesen Röntgogrammen eine Kenntniss betreffend die Axen der Dorsal- und Volarflexionsbewegungen der Hand zu erhalten wäre. Die Untersuchung hat sich dabei auf die Bewegung zwischen dem Capitatum und dem Lunatum, wie dem Lunatum und dem Radius bezogen, und ich bin dabei nach derselben Methode wie beim Studium der Abductionsbewegungen zu Wege gegangen. Indess ist es nun dadurch, dass sowohl das Lunatum als das Capitatum und der Radius correspondirende Bilder gegeben, möglich gewesen, die Bewegung in den beiden Carpalgelenken gesondert zu untersuchen.

Wie gezeigt worden, nimmt das Triquetrum in demselben Grade wie das Lunatum an den Dorsal- und Volarflexionsbewegungen Theil. Ob es sich auch um eine feste Axe bewegt, und ob diese Axe in solchem Falle für das Lunatum und das Triquetrum gemeinsam ist oder nicht, kann ich nicht entscheiden, weil das Projectionsbild des Triquetrum sowohl der Form als der Lage nach von der Rollung der Hand in dem Grade beeinflusst worden ist, dass eine solche Untersuchung unmöglich gewesen ist. Derselbe Fall ist es leider mit dem Naviculare.

Das Radiocarpalgelenk.

Die Röntgogramme der Volarflexions- und der Dorsalflexionsstellung wurden über einander eingepasst, so dass die Contouren der Vorderarmknochen zusammenfielen (wie sie in Taf. VII Fig. 20 über einander gezeichnet sind). Die proximale Contour des Lunatum in der einen Stellung fiel dann mit dem Theile von derselben Contour in der zweiten Stellung zusammen, welcher die Gelenkfläche des Radius berührte. Der Mittelpunkt für die Curvatur der proximalen Fläche des Lunatum auf diesem Theile wurde mit dem Zirkel ermittelt, und es ergab sich da, dass er im Punkte C lag (Taf. VII Figg. 14 und 16).

Wenn man die Contouren des Lunatum bei der Dorsal- und Volarflexion über einander placirt (wie sie in Taf. VII Fig. 20 über einander gezeichnet sind), dann fallen die Punkte C_1 auf Taf. VII Fig. 14 und C_3 in Taf. VII Fig. 16 zusammen. — Sie fallen auch zusammen, wenn man die Contouren der Vorderarmknochen über einander einstellt. Der Punkt C bleibt während der Bewegung fest im Verhältniss zu den Projectionsbildern des Lunatum wie des Radius. Dieser Punkt bildet also die Projection der Axe für die Bewegung des Lunatum gegen den Radius.

Dieser Punkt liegt in gleicher Höhe mit dem tiefsten Theile der distalen Gelenkfläche des Lunatum.

Das Intercarpalgelenk.

Auf dem Capitatum wurde eine Linie gezogen (nicht auf den Figuren) in gleicher Lage auf beiden Bildern dieses Knochens und ungefähr 3 ^{cm} distal von der proximalen Fläche des Capitatum. Wenn das Capitatum sich gegen das Lunatum um eine feste, quere Axe bewegt, so wird die auf dem Projectionsbilde im Verhältniss zum Capitatum fixe Linie während der Bewegung des Capitatum Tangente zu einer Kreislinie mit der Projection dieser Axe als Mittelpunkt bleiben.

Die Bilder der Volar- und der Dorsalflexionsstellung werden über einander eingepasst, so dass die Contouren des Lunatum zusammenfallen. Die im Verhältniss zum Capitatum fixe Linie wird auf eines der Röntgenbilder in ihre Lage zum Projectionsbilde des Lunatum bei sowohl Volar- als Dorsalflexion gezeichnet. Unter den Kreislinien, welche diese beiden Linien tangiren, wird die aufgesucht, deren Mittelpunkt zwischen den gezogenen Linien und der proximalen Fläche des Capitatum liegt. Dieser Mittelpunkt befindet sich im Punkte M, welcher auf beide Röntgogramme gezeichnet ist.

Bei Untersuchung der Lage dieses Punktes zeigt es sich, dass, wenn man die Röntgogramme der Dorsal- und der Volarflexionsstellung über einander einpasst, so dass die Bilder des Capitatum zusammenfallen, die Punkte M_1 und M_3 auch zusammenfallen.

Der Punkt M ist durch die Construction in dieselbe Stellung zur Projection des Lunatum in dessen Volar- und Dorsalflexionsstellung verlegt. Da dieser Punkt auch im Verhältniss zum Capitatum während der ganzen Bewegung dieses Knochens gegen das Lunatum fest bleibt, so geht daraus hervor, dass die Axe für die Bewegung zwischen dem Capitatum und dem Lunatum durch den Punkt M läuft, der in der Mitte vom Capitulum Capitati liegt.

In Fall IV ist die Axe (M) für die Dorso-volarflexion zwischen dem Capitatum und dem Lunatum in der Längsrichtung des Capitatum auf dem Projectionsbilde 7 mm von der proximalen ossösen Fläche des Capitatum belegen. Auf den Flächenansichten der Abductionsstellungen (Taf. V Figg. 1 und 2) ist der Krümmungshalbmesser für die proximale Fläche des Capitatum in der Frontalebene 7·5 mm.

In Fall I, wovon Randbilder in Taf. VII Figg. 17 bis 19 wiedergegeben sind, sind auf den Röntgogrammen die Krümmungshalbmesser für die Curvatur der proximalen Fläche des Capitatum in der Sagittalebene 7 mm und in der Frontalebene 8 mm.

Die proximale Fläche des Capitatum hat also in sagittaler Richtung nur einen ungefähr 1 mm kürzeren Krümmungshalbmesser als in frontaler Richtung. Man kann also approximativ annehmen, dass die Axen für die Abductionsbewegungen und die Dorso-Volarflexionsbewegungen zwischen dem Capitatum und dem Lunatum einander schneiden.

Die Projection der proximalen Fläche des Capitatum entspricht in Fall IV keinem Kreisbogen mit dem gefundenen Rotationscentrum als Mittelpunkt. Dies kann daher kommen, dass es möglicher Weise nicht die Contour der Gelenkfläche in der Medianebene ist, sondern der ulnare Rand der proximalen Gelenkfläche, der hier auf den Röntgogrammen als proximale Grenze für das Capitatum hervortritt. Es wäre auch so zu erklären, dass die Lampe vielleicht der Axe für die Rotationsfläche des Capitatum nicht nahe genug eingestellt gewesen ist, um eine kreisförmige Projection derselben zu erzeugen.

Um zu untersuchen, wie die knorpelbekleideten Flächen des Lunatum den gefundenen Rotationscentren für die Dorso-Volarflexion der Hand entsprechen, habe ich einen Gipsabguss von einem knorpelbe-

kleideten Lunatum gemacht und Wachs zur Form benutzt. Nach Vergleich der Stellung des Lunatum auf Flächenansichten und Randbildern von der Streckstellung der Hand habe ich einen sagittalen Schnitt durch dieses Gipsmodell gelegt, und zwar auf dessen grösster Breite. Die Contour dieses Sagittalschnittes habe ich copirt. Dieses copirte Bild wird in den Figg. 4 und 5 S. 228 wiedergegeben. Die Form des Sagittalschnittes stimmt mit der Form des Projectionsbildes des Lunatum auf den Röntgogrammen gut überein. Siehe Taf. VII Figg. 14 bis 19.

Auf dem Sagittalschnitt (Fig. 4 S. 228) habe ich versucht, den Mittelpunkt der Curvatur der beiden Gelenkflächen zu finden. Keine von ihnen bildet ja eine exacte Kreislinie. Wie aber aus der Figur hervorgeht, entspricht der Punkt *M* dem Centrum für die Curvatur der distalen Gelenkfläche, ausser in deren volarster Partie, welche einen grösseren Krümmungshalbmesser hat.

Die Curvatur der distalen Gelenkfläche in der Sagittalebene erlaubt also eine Rotation um *M*. Die Kreislinie d_1—v_1 auf der Figur ist mit *M* als Mittelpunkt gezogen.

Der Punkt *C* auf der Figur ist der Mittelpunkt für die Curvatur der proximalen Gelenkfläche im mittelsten Theile derselben. Die vordere und die hintere Partie derselben haben dagegen einen anderen Krümmungshalbmesser und erheben sich über eine Kreislinie, welche in der Fortsetzung der Curvatur der mittelsten Partie verläuft. Die proximale Gelenkfläche des Lunatum gestattet also eine Rotation dieses Knochens um eine durch *C* laufende Axe. Die Kreislinie *d*—*v* in Fig. 4 S. 228 ist mit *C* als Mittelpunkt gezogen. Die Punkte *d*, *v* und d_I, v_I bezeichnen die Grenzen für die knorpelbekleideten Flächen.

Die Lage der auf den Röntgogrammen gefundenen Rotationscentren *M* und *C*, Taf. VII Fig. 14 und Fig. 16, stimmt mit der Lage der auf dem Sagittalschnitte gefundenen gleichbenannten Mittelpunkte für die Contouren der Rotationsflächen des Lunatum gut überein.

Die Röntgogramme zeigen, dass die Dorso-Volarflexion zwischen dem Capitatum und dem Lunatum im Intercarpalgelenke und zwischen dem Lunatum und dem Radius im Radiocarpalgelenke um quere, frontale Axen und nicht um schiefe, zwischen der Sagittalebene und der Frontalebene gestellte, Axen ausgeführt wird. Theils bewahren das Capitatum und das Lunatum, während der Bewegung ihr Projectionsbild so genau, wie es nicht der Fall sein könnte, wenn sie sich in einer Ebene bewegten, die mit der Photographieplatte einen Winkel bildete. Theils geben die Bewegungsaxen punktförmige Projectionen,

die sich auf derselben Stelle der Projectionsbilder der betreffenden Knochen während der ganzen Bewegung befinden, was nur der Fall sein kann, wenn die Bewegungsaxen rechtwinkelig zur Projectionsebene verlaufen. Endlich entspricht die Verschiebung während der Bewegung zwischen den Projectionsbildern der betreffenden Knochen auf der Sagittalbene vollständig der Grösse der ganzen in der Sagittalebene ausgeführten Bewegung (siehe S. 246), und die Flächenansichten der Dorsal- und Volarflexionsstellungen der Hand (Taf. VI Figg. 12 und 13) geben keine von der Dorso-Volarflexion bewirkte seitliche Verschiebung in den Carpalgelenken an (siehe S. 231).

Aus den Röntgogrammen geht also hervor, dass die Dorsal- und Volarflexion im Intercarpalgelenke zwischen dem Capitatum und dem Lunatum und im Radiocarpalgelenke zwischen dem Lunatum und dem Radius um verschiedene quere, frontale Axen ausgeführt wird.

Bei der Behandlung der Volar- und Dorsalflexion der Hand geben Braune und Fischer (8) an, dass sie mit einer ähnlichen Anordnung, wie hier auf Seite 185 beschrieben, die Theilnahme der beiden Carpalgelenke an der Bewegung bestimmt haben. Sie theilen indess nicht die Lage des Centrums für die Curven mit, die sie dadurch erhielten, dass sie die Endpunkte der Stifte projicirten, welche die Bewegung zwischen dem Lunatum und dem Radius bezw. Capitatum und Lunatum aufgezeichnet haben.

Die Curve, die sie dadurch erhielten, dass sie in der Sagittalebene den Endpunkt eines mit dem Metacarpale III verbundenen Stiftes während einer Anzahl Momente von der Bewegung der ganzen Hand projicirten, bildete einen Kreisbogen mit dem Centrum im Capitulum Capitati.

Ich habe durch eine Construction 16 der Projectionsbilder aufgelegt, die ein Punkt auf der Längsaxe des Capitatum, 23 cm vom Mittelpunkte des Capitulum Capitati, bei der Dorsal- und Volarflexionsbewegung der Hand geben würde, unter der Annahme, dass bei der Volarflexion der Hand das Verhältniss zwischen der Bewegung des Radiocarpal- und des Intercarpalgelenkes constant 2:1 ist, und dass bei der Dorsalflexion dieses Verhältniss während der ganzen Bewegung 1:2 ist, mit einem Ausschlag des ganzen Gelenksystems volarwärts von 63° und dorsalwärts von 72° (siehe Fall I Tab. II), wie dass die Rotationscentren für die Bewegung zwischen dem Capitatum und dem Lunatum und zwischen dem Lunatum und dem Radius (wie in Fall IV) in einer Entfernung von 9 mm von einander liegen.

Diese Projectionspunkte liegen auf einer Curve, die ja allerdings nicht eine exacte Kreislinie bildet, aber einem Kreisbogen ausserordentlich nahe kommt, dessen Mittelpunkt im proximalen Theile des Capitulum Capitati liegt.

Die Beobachtung von Braune und Fischer, dass der Endpunkt eines mit dem Capitatum verbundenen Stiftes bei den Dorsal- und Volarflexionsbewegungen der Hand in der Sagittalebene Projectionen giebt, die in einer Curve liegen, welche dem Augenmaasse nach von einem Kreisbogen nicht wesentlich abweicht, dessen Mittelpunkt im Capitulum Capitati liegt, widerspricht nicht, hiernach zu urtheilen, dass die Dorso-Volarflexion im Handgelenke um zwei transversale Axen ausgeführt wird, die durch die von mir auf den Röntgogrammen gefundenen Rotationscentren laufen.

4. Theilnahme des Radiocarpal- und des Intercarpalgelenkes an der Dorsal- und Volarflexion der Hand.

a) Die Bewegung zwischen der distalen Carpalreihe und dem Lunatum-Triquetrum, wie zwischen diesen Knochen und dem Radius.

Fall IV (Taf. VII Fig. 14 bis 16). Bei der Radiographirung dieser Serie wurde die Hand erst in Volar- und Dorsalflexionsstellung und zuletzt in Streckstellung beleuchtet. Während der Vorderarm bei den beiden ersteren Handstellungen nahezu dieselben Contouren gegeben hat, ist der Arm dagegen beim Uebergehen der Hand zur Streckstellung gerollt worden, so dass die Projectionsbilder der Vorderarmknochen verändert worden sind. Es sind die distalen Theile der Seitencontouren dieser Knochen, welche dadurch verändert worden sind, indem sie sich im Verhältniss zum proximalen Theile der auf dem Röntgogramme sichtbaren Diaphysenpartie verschoben haben. Ausserdem hat der Arm seine Neigung gegen die Unterlage verändert, so dass die distale Contour der Ulna mehr proximal auf dem Radius als in den beiden anderen Bildern projicirt ist.

Auch die Bilder des Capitatum und des Lunatum sind von dieser Bewegung beeinflusst worden. Die Veränderungen auf dem Streckstellungsbilde sind indess nicht grösser, als dass man den Grad der Bewegungen dieser Knochen von der Streckstellung zu der Dorsal- und Volarflexionsstellung ziemlich genau beurtheilen kann.

So sind die volaren und proximalen Contouren des Lunatum fast unverändert, auch giebt die sichtbare Partie der distalen Gelenkfläche

einigen Anhalt zur Beurtheilung der Stellung des Lunatum. Auf dem Capitatum sind die sichtbaren Partien der dorsalen und proximalen Contouren auf dem Streckstellungsbilde über dieselben Contouren auf den beiden anderen Bildern eingestellt worden. Die volare Contour des Capitatum und die dorsale Contour des Metacarpale III decken dabei nicht die entsprechenden Contouren auf den anderen Bildern, laufen aber ungefähr parallel mit ihnen. Infolge der Veränderungen der Contour des Radius auf dem Streckstellungsbilde ist es nicht möglich gewesen, die ganze Contour des Radius über dessen Contour auf den Volar- und Dorsalflexionsbildern einzupassen, sondern die Volar- und Dorsalflexion des Lunatum und des Capitatum gegen den Radius von der Streckstellung aus ist mittels deren verschiedener Neigung gegen die auf den Röntgogrammen sichtbare Partie der Diaphyse des Radius berechnet worden.

Das Intercarpalgelenk. Auf dem Volarflexionsbilde (Taf. VII Fig. 14) ist die Linie *1* in dieselbe Stellung zum Capitatum verlegt wie die Linie *3* auf dem Dorsalflexionsbilde (Taf. VII Fig. 16). Die Linie *2* auf dem Streckstellungsbilde (Taf. VII Fig. 15) ist durch die eben beschriebene Einstellung in dieselbe Neigung zur Längsaxe des Capitatum verlegt, wie die Linie *1* in Taf. VII Fig. 14 und die Linie *3* in Taf. VII Fig. 16. Die Linie *I* in Taf. VII Fig. 14 und die Linie *III* in Taf. VII Fig. 16 sind in derselben Stellung zum Lunatum gezogen wie die Linien *II* in Taf. VII Fig. 15. Weil bei der Streckstellung der Hand (Taf. VII Fig. 15) die Linie *2* auf dem Capitatum und die fixe Linie *II* auf dem Lunatum ihrer Richtung nach zusammenfallen, giebt der Winkel zwischen den Linien *1* und *I* in Taf. VII Fig. 14 den Ausschlag im Intercarpalgelenk bei der Volarflexion (= 18°) an. Der Winkel zwischen den Linien *3* und *III* in Taf. VII Fig. 16 giebt den Ausschlag im Intercarpalgelenke bei dorsaler Flexion (= 29°) an. Die ganze Bewegung zwischen dem Capitatum und dem Lunatum ist also 47°.

Das Radiocarpalgelenk. Auf dem Bilde der Volarflexionsstellung (Taf. VII Fig. 14) sind nach einander die Bilder der Dorsalflexion und der Streckstellung angebracht worden, so dass die Contouren des Radius über einander eingepasst worden sind. Die im Verhältniss zum Lunatum fixe Linie ist in ihren verschiedenen Stellungen zum Radius bei der Streckstellung (*II*) und der Dorsalflexionsstellung (*III*) gezeichnet worden. Der Winkel zwischen den Linien *I* und *II*, welcher die Volarflexion im Radiocarpalgelenke angiebt, ist 24°. Die Abweichung zwischen den Linien *II* und *III*, welche die

Dorsalflexion im Radiocarpalgelenke angiebt, ist 27°. Die ganze Bewegung zwischen dem Lunatum und dem Radius ist folglich 51°.

Auf das Dorsalflexionsbild (Taf. VII Fig. 16) ist das Volarflexionsbild (Taf. VII Fig. 14) so eingepasst worden, dass die Contouren des Radius einander decken. Die im Verhältniss zum Capitatum mit der Linie *3* analog gelegene Linie *1* ist darnach auf die Fig. 16 Taf. VII gezeichnet worden. Der Winkel zwischen den Linien *1* und *3* giebt die Grösse der ganzen Bewegung des Capitatum (= der ganzen Hand) gegen den Radius an. Dieser Winkel ist 98°. — 47° von dieser Bewegung sind im Intercarpalgelenke, 51° im Radiocarpalgelenke ausgeführt. Die Summe der Ausschläge des Radiocarpal- und des Intercarpalgelenkes in volarer Richtung ist 42° und in dorsaler Richtung 56°.

Fall I. Taf. VII Fig. 17 bis 19.

Diese Röntgogramme geben die radiale Seite (diese Seite nach der Platte) derselben Hand wieder, die unter der Bezeichnung Fall I bei der Besprechung der Abductionsbewegungen geschildert wird. Beim Uebergehen der Hand in die verschiedenen Stellungen hat eine Bewegung des Vorderarmes stattgefunden. Den Contourveränderungen nach zu urtheilen, ist die Neigung des Unterarmes gegen die Platte etwas geändert worden, und überdies hat eine unbedeutende Rollung stattgefunden. Wie aus den Figuren hervorgeht, sind indess die Veränderungen der Vorderarmknochen, wie die Projectionsbilder des Capitatum und des Lunatum nicht sonderlich gross. Sie sind indess hinreichend, um eine völlig sichere Einstellung der Projectionsbilder der betreffenden Knochen in den verschiedenen Handstellungen über einander zu verhindern. Andererseits sind die Veränderungen nicht grösser, als dass Anhaltspunkte zur Beurtheilung der Bewegung der beiden Carpalreihen in der Sagittalebene erhalten werden können.

Es sind die Seitencontouren der Epiphyse des Radius und die Projection des Processus styloideus Radii, welche verändert worden sind. Die auf den Röntgogrammen vorliegende Partie der Diaphyse des Radius ist dagegen unverändert, ebenso die Projection der distalen Gelenkfläche. Das Lunatum hat seine proximale Contour verändert, und auf dem Dorsalflexionsbilde (Taf. VII Fig. 19) kann diese nicht von der Contour der Gelenkfläche des Radius unterschieden werden. Die Contour der distalen Gelenkfläche und ebenso die volare und dorsale Contour auf jedem der drei Bilder können indess gleichzeitig über die entsprechenden Contouren auf den übrigen eingestellt werden, und auf diese Weise kann man einen Anhalt für die Beurtheilung der Bewegung des Lunatum im Verhältniss zu Capitatum und Radius er-

halten. Die Contouren des Capitatum sind gleich geblieben, abgesehen von kleinen Abweichungen der dorsalen Contour bei der Dorsalflexionsstellung.

Der Punkt *M* ist der Mittelpunkt für die Curvatur der Projection von der proximalen Gelenkfläche des Capitatum. Durch diesen Punkt sind die Linien *1* (Taf. VII Fig. 17), *2* (Taf. VII Fig. 18) und *3* (Taf. VII Fig. 19) in derselben Stellung zum Capitatum gezogen.

Stellt man die Bilder des Lunatum über einander ein, so dass dessen distale und volare Contouren auf den verschiedenen Bildern einander decken, dann fallen auch die dorsalen Contouren zusammen, während die proximalen Contouren neben einander laufen. Werden die Bilder des Lunatum auf diese Weise über einander eingepasst, dann fallen auch die Punkte M_1, M_2 und M_3 auf dem Capitatum über einander. Auf das Lunatum sind in dessen verschiedenen Stellungen die — nach eben beschriebener Einstellung — analog liegenden Linien I (Taf. VII Fig. 17), *II* (Taf. VII Fig. 18) und *III* (Taf. VII Fig. 19) gezeichnet.

Das Radiocarpalgelenk. Auf dem Dorsalflexionsbilde (Taf. VII Fig. 19) sind durch Einstellung der Bilder des Radius über einander die Lagen der auf dem Lunatum festen Linie zum Radius bei der Volarflexion I, bei der Streckstellung II und bei der Dorsalflexion III gezeichnet. Hierdurch wird eine Volarflexion des Lunatum gegen den Radius von 42° und eine Dorsalflexion von 22° angegeben. Die ganze Bewegung zwischen dem Lunatum und dem Radius ist also etwa 64°.

Das Intercarpalgelenk. Auf dem Streckstellungsbilde (Taf. VII Fig. 18) ist durch Einstellung der Bilder des Lunatum über einander die auf dem Capitatum fixe Linie in ihrer Stellung zum Lunatum gezeichnet, und zwar bei Volarflexion (1), bei Streckstellung (2) und bei Dorsalflexion (3). Dadurch wird eine Volarflexion zwischen dem Capitatum und dem Lunatum von 19° und eine Dorsalflexion von 53° angegeben. — Die ganze Bewegung zwischen diesen Knochen ist also etwa 72°.

Auf dem Volarflexionsbilde (Taf. VII Fig. 17) ist nach Einstellung der Bilder des Radius über einander die auf dem Capitatum fixe Linie in ihrer Neigung gegen Radius bei Volarflexion der Hand (1), Streckstellung (2) und Dorsalflexion (3) gezeichnet. Dadurch wird angegeben, dass das Capitatum im Verhältniss zum Radius 62° volar flectirt und 73° dorsal flectirt worden ist. Die Summe der für das Radiocarpal- und das Intercarpalgelenk gesondert gefundene Volarflexion war 61° und deren zusammengelegte Dorsalflexion 75°.

In Fall IV sind weder Dorsal- noch Volarflexion in grösstmög-

lichem Grade ausgeführt, um bei den anstrengenderen extremen Momenten der Bewegung eine Verrückung des Armes zu vermeiden. Eine Bewegung von ungefähr 30° war noch möglich.

In Fall I ist die Bewegung, so weit dies durch die eigene Kraft des Armes geschehen konnte, ausgeführt.

Wie oben erwähnt, verändert das Triquetrum während der Dorsal- und Volarflexion seine Neigung gegen das Lunatum nicht. Die nun angeführten Gradzahlen beziehen sich deshalb auf die Bewegung der distalen Carpalreihe (des Capitatum), gegen das Lunatum-Triquetrum und die Rotation dieser Knochen gegen den Vorderarm.

Meinen beiden Fällen nach zu urtheilen, ist das Verhältniss zwischen der Theilnahme des Radiocarpal- und des Intercarpalgelenkes an der Dorsal- und Volarflexion der Hand, so weit dies der Bewegung zwischen der distalen Carpalreihe und dem Lunatum-Triquetrum und zwischen diesen Knochen und dem Radius gilt, nicht constant.

In beiden Fällen ist indess bei der Volarflexion die Bewegung des Radiocarpalgelenkes grösser als die des Intercarpalgelenkes, während bei der Dorsalflexion ein grösserer Theil der Bewegung im Intercarpalgelenke ausgeführt wird.

Während aber in Fall I die Theilnahme des Radiocarpalgelenkes an der Volarflexion etwas mehr als doppelt so gross ist als die des Intercarpalgelenkes (69 Procent der ganzen Volarflexion), und das Radiocarpalgelenk bei der Dorsalflexion einen etwas weniger als halb so grossen Ausschlag (29 Procent der ganzen Dorsalflexion) als das Intercarpalgelenk macht, so ist in Fall IV der Unterschied in der Grösse der Excursion der beiden Gelenke ziemlich gering, da das Radiocarpalgelenk an der Volarflexion mit 57 Procent der Bewegung und an der Dorsalflexion mit 48 Procent der Bewegung Theil nimmt.

An der ganzen Flexionsbewegung der Hand ist die Theilnahme der beiden Gelenke ungefähr gleich gross, indem das Radiocarpalgelenk in Fall I 47 Procent der Bewegung, in Fall IV 52 Procent ausgeführt hat.

Die von Braune und Fischer (8) gefundenen Zahlen für die Theilnahme des Radiocarpal- und des Intercarpalgelenkes an der Dorsal- und Volarflexion der Hand, welche sich auch auf die Bewegung des Capitatum und des Lunatum beziehen, da sie durch ein Verfahren erhalten worden sind, analog dem bei Berechnung der Theilnahme der Carpalgelenke an ulnarer und radialer Abduction angewandten, zeigen bei Dorsalflexion der Hand eine Bewegung von 18° (20 Procent) im Radiocarpalgelenk und 76° im Intercarpalgelenk, und

bei Volarflexion der Hand einen Ausschlag von 52° (65 Procent) im ersteren Gelenk und 25° im letzteren.

Die ganze Bewegung der Hand war 168°, wovon die eine Hälfte als Volar- und die andere als Dorsalflexion berechnet wurde.

Dieser Fall gleicht sehr meinem Fall I, indem bei der Volarflexion die Bewegung des Radiocarpalgelenkes, bei der Dorsalflexion die des Intercarpalgelenkes bedeutend überwiegt.

Es ist möglich, dass der in Fall IV weniger scharf hervortretende Unterschied zwischen der Theilnahme der beiden Gelenke an der Dorsal- und Volarflexion darauf beruht, dass in diesem Falle nur eine Bewegung von 98° gemacht worden ist, während eine grössere Bewegung (ungefähr 130°) ausführbar war, wenn nämlich eines der Gelenke bei steigender Flexion sich immer mehr geltend macht.

b) Die Bewegung des Naviculare gegen das Lunatum und die Bewegung zwischen der distalen Carpalreihe und dem Naviculare wie zwischen dem Naviculare und dem Radius.

Obgleich das Naviculare zwar in keiner meiner beiden Serien von Randbildern der Flexionsbewegungen der Hand congruente Contouren gegeben hat, gestattet doch dessen langgestrecktes Bild, da seine Form nur unbedeutend verändert worden ist, eine approximative Beurtheilung der Grösse der Bewegungen des Naviculare.

In Fall I ist es möglich gewesen, mit Hülfe der distalen und dorsalen Contouren des Naviculare eine approximative Schätzung der Bewegung des Naviculare zwischen allen drei Handstellungen auszuführen. In Fall IV haben nur die Bewegungen des Naviculare zwischen den Aussenstellungen der Hand berechnet werden können, weil auf dem Streckstellungsbilde theils ein zu kleiner Theil der Contour des Naviculare zu sehen ist, theils die sichtbare Partie zu viel verändert ist, als dass eine zuverlässige Schätzung der Bewegung des Naviculare von der Streckstellung aus gemacht werden könnte.

Fall IV. Da ich die Figuren nicht durch mehr Constructionslinien allzu verwickelt machen will, habe ich in einer besonderen Figur (Taf. VII Fig. 20) das Naviculare in seiner Stellung zum Lunatum bei der Volar- und Dorsalflexion der Hand in Fall IV gezeichnet.

Die Figur ist in der Weise erhalten, dass die Contouren der Vorderarmknochen, des Lunatum und des Naviculare auf dem Volarflexionsbilde der Hand mit ausgezogenen Linien durchgepaust sind. Darauf ist das Dorsalflexionsbild der Hand über dem ersteren Bilde eingestellt worden, so dass die Contouren des Lunatum auf den beiden Bildern über

einander eingepasst worden sind. Die Stellung des Naviculare zum Lunatum ist nun durch eine punktirte Contour gekennzeichnet. Die Partien der Contour des Lunatum auf dem Dorsalflexionsbilde, welche nicht mit dessen Contour auf dem Volarflexionsbilde zusammenfallen, sind auch mit punktirten Linien[1] bezeichnet.

Die Linie *nav. 3* auf dem Dorsalflexionsbilde des Naviculare ist mit der Genauigkeit, womit dies sich mit Hülfe der sichtbaren Partien des Naviculare thun lässt, in derselben Lage zum Naviculare gezeichnet wie die Linie *nav. 1* auf dessen Volarflexionsbilde. Der Winkel zwischen diesen beiden Linien giebt die Bewegung des Naviculare gegen das Lunatum annähernd an und beträgt 32°.

Die Bewegung des Naviculare gegen den Radius — gemessen durch die Winkel, welche auf die Bilder des Naviculare analog angebrachte Linien (nicht auf die Figuren gezeichnet) bei der Volar- und Dorsalflexion der Hand mit dem Radius bilden — beträgt etwa 83°.

Die Bewegung der distalen Carpalreihe gegen das Naviculare — gemessen durch den Grössenunterschied zwischen den Winkeln, welche auf die Bilder des Naviculare analog angebrachte Linien bei der Volarflexion und Dorsalflexion der Hand mit den auf die Bilder des Capitatum analog gelegten Linien bilden — beträgt 15°.

Fall I. In diesem Falle habe ich durch Messung des Winkels in den drei Stellungen der Hand zwischen den im Verhältniss zum Capitatum analogen Linien *1*, Taf. VII Fig. 17, *2*, Taf. VII Fig. 18 und *3*. Taf. VII Fig. 19, und einer zum Naviculare in dessen verschiedenen Stellungen so genau als möglich analog gelegten Linie (nicht auf die Figuren gezeichnet), die Bewegung des Capitatum gegen das Naviculare sowohl bei dorsaler, als volarer Flexion gleich 11° befunden, die ganze Bewegung also gleich 22°. Die Bewegung des Naviculare gegen den Radius war 50° Volarflexion und 63° Dorsalflexion.

Die Bewegung des Naviculare gegen das Lunatum, welche durch Messung des Winkels zwischen den auf das Lunatum gelegten Linien *I*, Taf. VII Fig. 17, *II*, Taf. VII Fig. 18, und *III*, Taf. VII Fig. 19, und den auf das Naviculare in dessen verschiedenen Stellungen analog gelegten Linien erhalten wurde, beträgt 8° Volarrotation und 41° Dorsalrotation.

---

[1] Ueber die Contouren der Vorderarmknochen auf dem Volarflexionsbilde (ausgezogene Linien) sind auch die Contouren dieser Knochen auf dem Dorsalflexionsbilde gezeichnet, welche auf den Stellen, wo die betreffenden Contouren nicht zusammenfallen, mit punktirten Linien angegeben sind.

Berechnet man aus diesen Ziffern die Bewegung zwischen dem Capitatum und dem Lunatum, wie zwischen dem Lunatum und dem Radius, so erhält man eine Volarflexion des Capitatum gegen das Lunatum von 19° (19°) und eine Dorsalflexion von 52° (53°), wie eine Volarrotation des Lunatum gegen den Radius von 42° (42°) und eine Dorsalrotation von 22° (22°). Wie ersichtlich, ist es nur die Dorsalflexion des Capitatum gegen das Lunatum, welche sich (um 1°) von den durch die vorhergehende Bestimmung gefundenen Zahlen scheidet, welche in Klammern angegeben sind.

Die Volar- und Dorsalflexion der Hand zeichnet sich dadurch aus, dass eine Rotation in der Richtung der Bewegung der Hand in der proximalen Carpalreihe vorkommt, nämlich zwischen dem Naviculare und dem Lunatum-Triquetrum. Durch diese Rotation führt das Naviculare eine entsprechende grössere Bewegung gegen den Radius aus als diese Knochen. Die Bewegung zwischen der distalen Carpalreihe und dem Naviculare ist auch in entsprechendem Grade geringer als die Rotation zwischen der distalen Carpalreihe und dem Lunatum-Triquetrum, und beträgt nur etwa $^1/_6$ der totalen Bewegung der Hand, in Fall I 22° in Fall IV 15°.

Bei der Dorsalflexion der Hand geschieht eine grössere Bewegung zwischen der distalen Carpalreihe und den Lunatum-Triquetrum, als zwischen diesen Knochen und dem Vorderarm, während bei der Volarflexion das Gegentheil der Fall ist.

Bei sowohl dorsaler als volarer Flexion ist dagegen die Bewegung zwischen dem Naviculare und dem Radius bedeutend grösser (ungefähr 84 Procent der ganzen Bewegung) als die Rotation, welche zwischen der distalen Carpalreihe und dem Naviculare erfolgt.

Daher wird der grösste Theil der Bewegung des Naviculare gegen das Lunatum bei der Dorsalflexion der Hand ausgeführt. In Fall I erfolgen ungefähr $^5/_6$ der Rotation des Naviculare gegen das Lunatum bei Dorsalflexion der Hand. Auch aus den ulnaren Randbildern (Fall IV) geht hervor, dass der grösste Theil der Bewegung des Naviculare gegen das Lunatum bei Dorsalflexion stattfindet, obgleich der Grad der Bewegung des Naviculare hier nicht von der Streckstellung aus berechnet werden kann.

In Fall I wurde die bei den Abductionsbewegungen auftretende Dorso-Volarflexion zwischen dem Naviculare und dem Capitatum approximativ auf 20° geschätzt. Wenn man das radiale Randbild der Radialabduction (Taf. VI Fig. 11) mit dem Dorsalflexionsbilde von radialer Seite

(Taf. VII Fig. 19) vergleicht, so findet man, dass die Stellung des Naviculare zur distalen Carpalreihe auf beiden Bildern nahezu gleich ist. Dies ist auf dem Ulnar-Abductionsbilde (Taf. VI Fig. 10) und dem Volarflexionsbilde (Taf. VII Fig. 17) auch der Fall. Bei der während der Abductionsbewegungen auftretenden Dorso-Volarflexion der proximalen Carpalreihe scheint also das Naviculare den grössten Theil seiner Beweglichkeit oder vielleicht sein ganzes Bewegungsvermögen gegen die distale Carpalreihe auszunützen.

Kurze Zusammenfassung.

Bei ulnarer und radialer Abduction der Hand rotiren sowohl die proximale als die distale Carpalreihe um eine sagittale Axe, welche durch die Mitte des Capitulum Capitati läuft.

Obgleich weder die proximale, noch die distale Carpalreihe Gelenkflächen hat, welche als Ganzes Rotationsflächen mit erwähnter Axe entsprechen, wird doch eine Rotation um dieselbe auf die Weise ermöglicht, dass durch die mit den Abductionsbewegungen gleichzeitige Rotation der proximalen Carpalreihe in sagittaler Richtung zwischen der distalen Carpalreihe und dem Vorderarm die Form der Contactfläche der proximalen Carpalreihe mit dem Radius allmählich geändert wird, so dass trotz der unregelmässigen Form der Gelenkpfanne eine Rotation um eine feste, sagittale Axe möglich wird.

In Folge der Beweglichkeit des Triquetrum gegen das Lunatum in proximodistaler Richtung kann die Rotation im Intercarpalgelenke unter der Leitung der proximalen Fläche des Capitatum ausgeführt werden, deren frontale Curvatur einer Rotationsfläche entspricht, gebildet um die Axe der Abductionsbewegungen, obgleich die Gelenkfläche des Hamatum gegen die proximale Carpalreihe eine andere Axe und einen grösseren Krümmungshalbmesser hat.

Bei ulnarer Abduction rotirt die proximale Carpalreihe in sagittaler Richtung zwischen der distalen Carpalreihe und dem Vorderarm, so dass sie gegen den Vorderarm dorsal flectirt und gegen die distale Carpalreihe volar flectirt wird. Bei radialer Abduction rotirt die proximale Carpalreihe volarwärts gegen den Vorderarm, dorsalwärts gegen die distale Carpalreihe. Die durch die Abduction der Hand erzeugte Flexionsbewegung der proximalen Carpalreihe verursacht in beiden Carpalgelenken eine gleich grosse Rotation in sagittaler Richtung, aber in entgegengesetzten Richtungen.

Durch die Dorso-Volarflexion der proximalen Carpalreihe wie durch

die Gleitbewegungen des Triquetrum gegen das Lunatum wird der radiale bezw. ulnare Rand der Gelenkpfanne des Intercarpalgelenkes gesenkt, wodurch eine Seitenrotation im Intercarpalgelenke hauptsächlich ermöglicht wird.

Die Abductionsbewegungen der Hand rufen keine zwangsmässige Rotation der Multangula in supinatorischer oder pronatorischer Richtung hervor.

Grössere Bewegungen des Daumens beeinflussen das Gelenk zwischen den Multangula.

An sowohl radialer wie ulnarer Abduction nehmen beide Carpalgelenke Theil, an ulnarer Abduction in ungefähr gleichem Grade, an radialer Abduction mit überwiegender Beweglichkeit im Intercarpalgelenk.

Bei der Volar- und Dorsalflexion der Hand wird die Rotation zwischen dem Capitatum und dem Lunatum, wie zwischen dem Lunatum und dem Radius um je eine quere, frontale Axe ausgeführt, von denen die erstere durch die Mitte des Capitulum Capitati, die letztere durch den tiefsten Theil der distalen Gelenkfläche des Lunatum läuft.

Bei der Volar- und Dorsalflexion der Hand kommt eine Rotation zwischen den Knochen in der proximalen Carpalreihe vor, indem das Naviculare durch Rotation gegen das Lunatum in der Richtung der Handbewegung an ungefähr $^{2}/_{3}$ der Bewegung der distalen Carpalreihe gegen das Lunatum-Triquetrum Theil nimmt, zum grössten Theil bei der Dorsalflexion der Hand.

Zwischen der distalen Carpalreihe und dem Naviculare kommt nur eine geringe Flexionsbewegung vor, nur ungefähr $^{1}/_{6}$ der ganzen Flexion der Hand entsprechend.

Bei Volarflexion der Hand wird eine grössere Bewegung zwischen dem Lunatum-Triquetrum und dem Vorderarm ausgeführt, als zwischen der distalen Carpalreihe und dem Lunatum-Triquetrum. Bei der Dorsalflexion ist dagegen die Bewegung zwischen der distalen Carpalreihe und diesen Knochen die grössere.

Die Verschiebung des Pisiforme gegen die proximale Carpalreihe ist sowohl bei Volar- und Dorsalflexion, als bei ulnarer und radialer Abduction der Hand in der Weise regulirt, dass der Musc. flexor carpi ulnaris direct auf die beiden Carpalgelenke einwirkt.

Tabelle I.
Die Betheiligung des Radiocarpal- und des Intercarpalgelenkes an den radialen und ulnaren Abductionsbewegungen der Hand.

	Von den bei der Exponir. eingen. Stell. berechnet.		Radio-carpalgelenk	Intercarpal-gelenk	Das ganze Handgelenk	Radiocar-palgel. %	Intercar-palgel. %	Von der gewählten Ausgangsstellung Uln. Abd.	Rad. Abd.
Fall I. 32j. Klavierspielerin.									
a) Rechte Hand. Volarseite	Uln. Abd.	1—2	7°	9°	16°	44	56	36°	24°
	Rad. Abd.	2—3	24°	20°	44°	55	45	60%	40%
		1—3	31°	29°	60°	51	49		
b) Rechte Hand. Dorsals.	Uln. Abd.	1—2	24°	22°	46°	52	48	34°	24°
	Rad. Abd.	2—3	4°	8°	12°	33	67	59%	41%
		1—3	28°	30°	58°	48	52		
Fall II. 10jähriger Knabe.	Uln. Abd.	1—2	12°	6°	18°	67	33	34°	11°
a) Rechte Hand. Volarseite	Rad. Abd.	2—3	10°	17°	27°	37	63	75%	25%
		1—3	22°	23°	45°	49	51		
b) Rechte Hand. Dorsals.	Uln. Abd.	1—2	17°	15°	32°	53	47	30°	15°
	Rad. Abd.	2—3	4°	9°	13°	31	69	67%	33%
		1—3	21°	24°	45°	47	53		
Fall III. 21jähr. Steinarb.									
Rechte Hand. Dorsalseite	Uln. Abd.	1—2	9°	12°	21°	43	57	19°	17°
	Rad. Abd.	2—3	2°	13°	15°	13	87	53%	47%
		1—3	11°	25°	36°	31	69		
Fall IV F., 24j. Stud. med.									
Linke Hand. Dorsalseite	Uln. Abd.	1—2	5°	3°	8°	62·5	37·5		
		2—3	5°	0°	5°	100	0	27°	31°
		3—4	2°	8°	10°	20	80	47%	53%
		4—5	2°	15°	17°	12	88		
	Rad. Abd.	5—7	0°	18°	18°	0	100		
		1—7	14°	44°	58°	24	76		
Fall V. L., 24j. Stud. med.									
Rechte Hand. Dorsalseite	Uln. Abd.	1—2	2°	4°	6°	33	67		
		2—4	2°	14°	16°	12·5	87·5	5°	35°
	Rad. Abd.	4—5	2°	16°	18°	11	89	13%	87%
		1—5	6°	34°	40°	15	85		

Tabelle II.

Die Betheiligung des Radiocarpal- und Intercarpalgelenkes an den Volar- und Dorsalflexionsbewegungen der Hand.

	Von den bei d. Exponir. eingen. Stell. berechnet		Radio-carpalgelenk	Intercarpal-gelenk	Das ganze Handgelenk		Radiocarpalgelenk %	Intercarpalgelenk %
Die Bewegung zwischen der distalen Carpalreihe und Lunatum-Triquetrum und zwischen diesen Beinen der proximalen Carpalreihe und Radius.								
Fall I.	Volarfl.	1—2	42°	19°	61°	(62°)	69	31
	Dorsalfl.	2—3	22°	53°	75°	(73°)	30	70
		1—3	64°	72°	136°	(135°)	47	53
Fall IV.	Volarfl.	1—2	24°	18°	42°		57	43
	Dorsalfl.	2—3	27°	29°	56°		48	52
		1—3	51°	47°	98°		52	48
Die Bewegung zwischen der distalen Carpalreihe und Naviculare und zwischen Naviculare und Radius.								
Fall I.	Volarfl.	1—2	50°	11°	61°		82	18
	Dorsalfl.	2—3	63°	11°	74°		85	15
		1—3	113°	22°	135°		84	16
Fall IV.		1—3	83°	15°	98°		85	15
Die Bewegung zwischen Naviculare und Lunatum.								
Fall I.	Volarfl.	1—2	8°				16	
	Dorsalfl.	2—3	41°				84	
		1—3	49°					
Fall IV.		1—3	32°					

Litteratur.

1. T. H. Bryce, On certain points in the anatomy and mechanism of the wristjoint reviewed in the light of a series of Röntgen ray photografs of the living hand. *Journal of anatomy and physiology.* 1896. Vol. XXXI.

2. E. Zuckerkandl, Notiz über den Mechanismus des Handgelenkes. *Anat. Anz.* (30. Jan. 1897.) Bd. XIII. S. 120 bis 124.

3. H. Virchow, Röntgenaufnahmen der Hand. *Sitz.-Ber. der Ges. naturf. Freunde.* Berlin. Jahrg. 1899. S. 79 bis 85.

4. Derselbe, Röntgenaufnahmen der Hand. *Ebenda.* S. 90 bis 96.

5. Derselbe, Das Skelett der ulnarwärts abducirten und radialwärts abducirten Hand. *Zeitschr. f. Morphpol. u. Anthropol.* Stuttgart 1899. Bd. I. Heft 3. S. 453 bis 482.

6. A. Bühler, Das Verhalten der Carpalknochen bei den Seitenbewegungen der Hand. *Anat. Anz.* Bd. XVI. S. 223 bis 229.

7. E. R. Corson, An X-Ray Study of the normal mouvments of the carpal bones and Wrist. 16 fig. *Proc. Assoc. Americ. Anat.* 11 sess. 1898. 1899 S. 67 bis 92.

8. W. Braune und O. Fischer, Untersuchungen über die Gelenke des menschlichen Armes. Theil II: Das Handgelenk. *Kgl. Sächs. Ges. d. Wiss.* Abh. math.-phys. Cl. Leipzig 1887 bis 1888. Bd. XVI.

9. Dieselben, Das Gesetz der Bewegungen in den Gelenken an der Basis des mittl. Fingers und im Handgelenk des Menschen. *Ebenda.* S. 223 bis 227.

Erklärung der Abbildungen.

Tafel V—VII.

Die Zeichnungen der Röntgogramme habe ich nach der auf S. 172 angegebenen Methode ausgeführt. Die Röntgenbilder sind, wie beschrieben, auf einem über die Hautseite der Photographieplatte gespannten durchsichtigen Papier copirt worden; auf den Figuren aber, mit Ausnahme der Fig. 12, sind die Zeichnungen umgekehrt, so dass die Figuren den Contouren einer gewöhnlichen photographischen Copie einer Röntgenplatte gleichen, d. h. dass die bei der Röntgographirung nach der Platte sehende Seite der Hand dem Zuschauer zugekehrt ist.

Wo nicht Anderes angegeben ist, sind die Contouren der Knochenflächen, die nach der Platte (dem Zuschauer) sehen, mit ausgezogenen Linien gezeichnet, die Contouren aber, welche von vorliegenden Knochen verdeckt sind, werden. durch punktirte Linien angegeben.

Um nicht das Archiv mit zu vielen Reproductionen zu belasten, sind neben den Pauscopien der Röntgogramme nicht auch die photographischen Copien derselben wiedergegeben worden. Diese stehen jedoch, wenn gewünscht, bei dem Verfasser zur Verfügung.

Tafel V.

Fig. 1 = Ulnare Abduction; dorsale Handfläche; linke Hand. Fall IV b.
Fig. 2 = Radiale „ „ „ „ „ Fall IV b.
Fig. 3 = „ „ „ „ „ „ Fall IV a.
Fig. 4 = Combination von den Figg. 1 und 2.
Figg. 5, 6 und 7 = Combinationen von den Figg. 1 und 2, um die Bewegungen des Pisiforme zu zeigen.

Tafel VI.

Fig. 8 = Ulnare Abd. vom ulnaren Rande der Hand gesehen. Fall I.
Fig. 9 = Radiale „ „ „ „ „ „ „ „
Fig. 10 = Ulnare Abd. vom radialen Rande „ „ „ „
Fig. 11 = Radiale Abd. „ „ „ „ „ „ „
Fig. 12 = Dorsalflexion von der Volarseite. Rechte Hand. Fall IV.
Fig. 13 = Volarflexion von der Dorsalseite. Rechte Hand. „

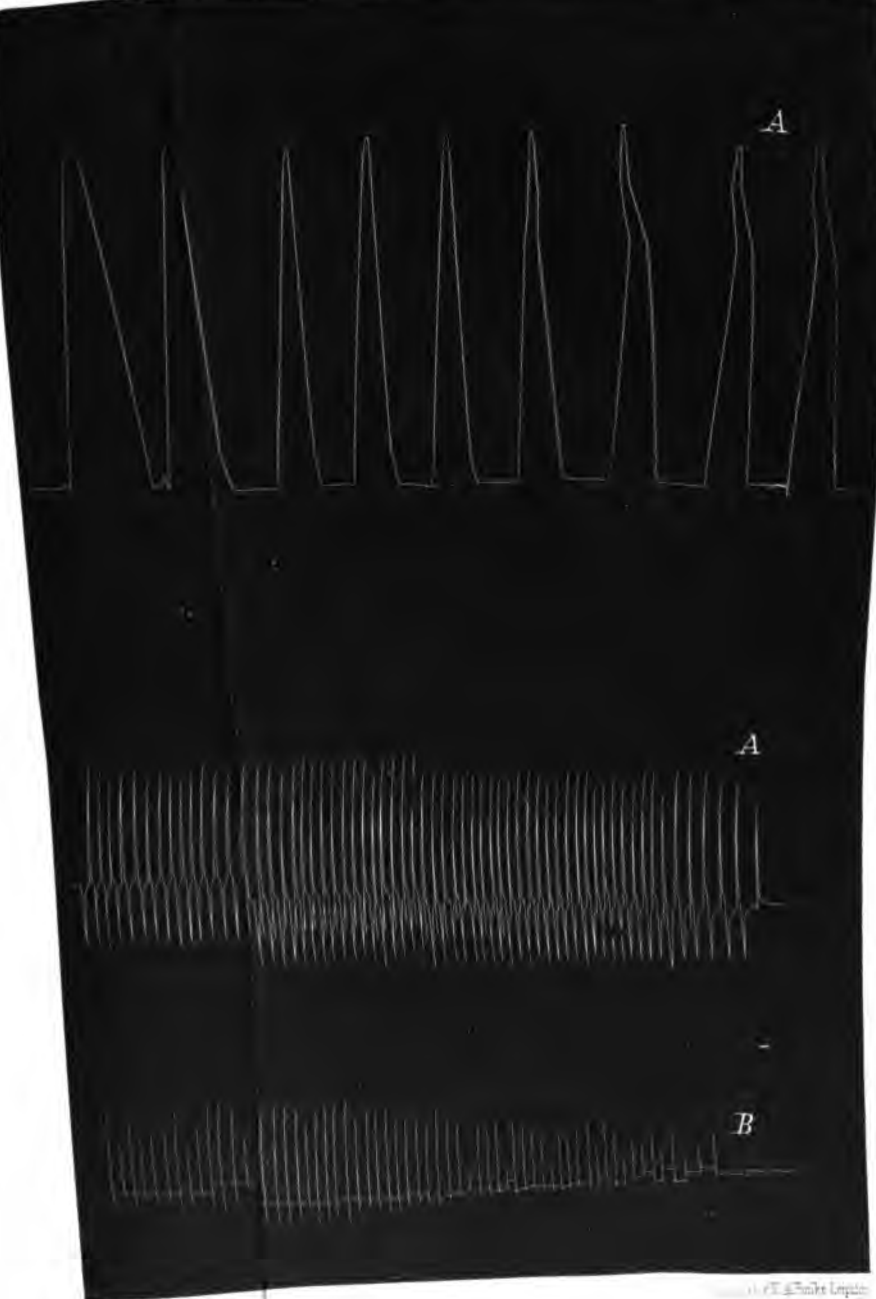
Tafel VII.

Fig. 14 = Volarflexion vom ulnaren Rande der linken Hand. Fall IV.
Fig. 15 = Streckstellung vom ulnaren Rande der linken Hand. Fall IV.
Fig. 16 = Dorsalflexion „ „ „ „ „ „ „
Fig. 17 = Volarflexion vom radialen Rande der rechten Hand. Fall I.
Fig. 18 = Streckstellung vom „ „ „ „ „ „
Fig. 19 = Dorsalflexion „ „ „ „ „ „ „
Fig. 20 = Combination von den Figg. 14 und 16, um die Bewegung des Naviculare gegen das Lunatum zu veranschaulichen.

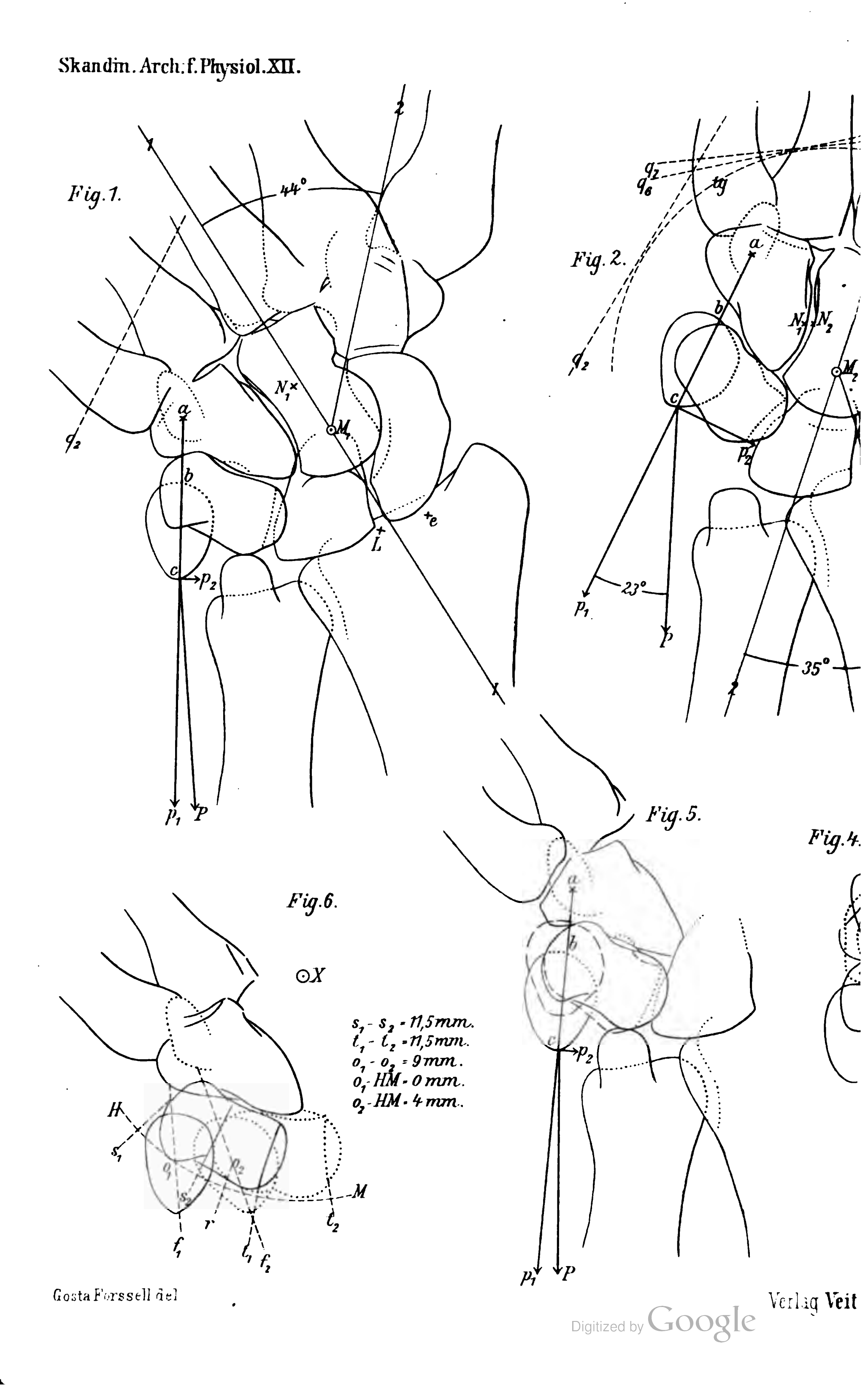
Die Figuren sind von derselben Grösse wie die Pauscopien.

Bei allen Exponirungen hat sich der Antikathodenspiegel 40 cm von der Photographieplatte befunden.

Bei der Aufnahme der Flächenbilder der Abductionsstellungen, wenn die Dorsalfläche der Hand der Platte zugekehrt ist, befinden sich die volaren Theile der Carpalknochen — mit Ausnahme der Eminentiae Carpi — in einer Entfernung von der Platte von ungefähr 3 cm. Die grösste Vergrösserung, welche auf den Bildern der Carpalknochen in den Figg. 1 bis 7 Taf. V vorkommt, ist also etwa 40 : 37 = 1·08 : 1. Wenn man auf den Randbildern der Flexionsstellungen (Figg. 14 bis 20 Taf. VII) nur die nach der Platte gekehrte Hälfte der Handwurzel berücksichtigt, so ist auf diesen Bildern die grösste Vergrösserung etwa 40 : 35 = 1·14 : 1, weil die von der Platte abgekehrte Fläche des Capitatum sich in einer Entfernung von derselben von etwa 5 cm befunden hat.

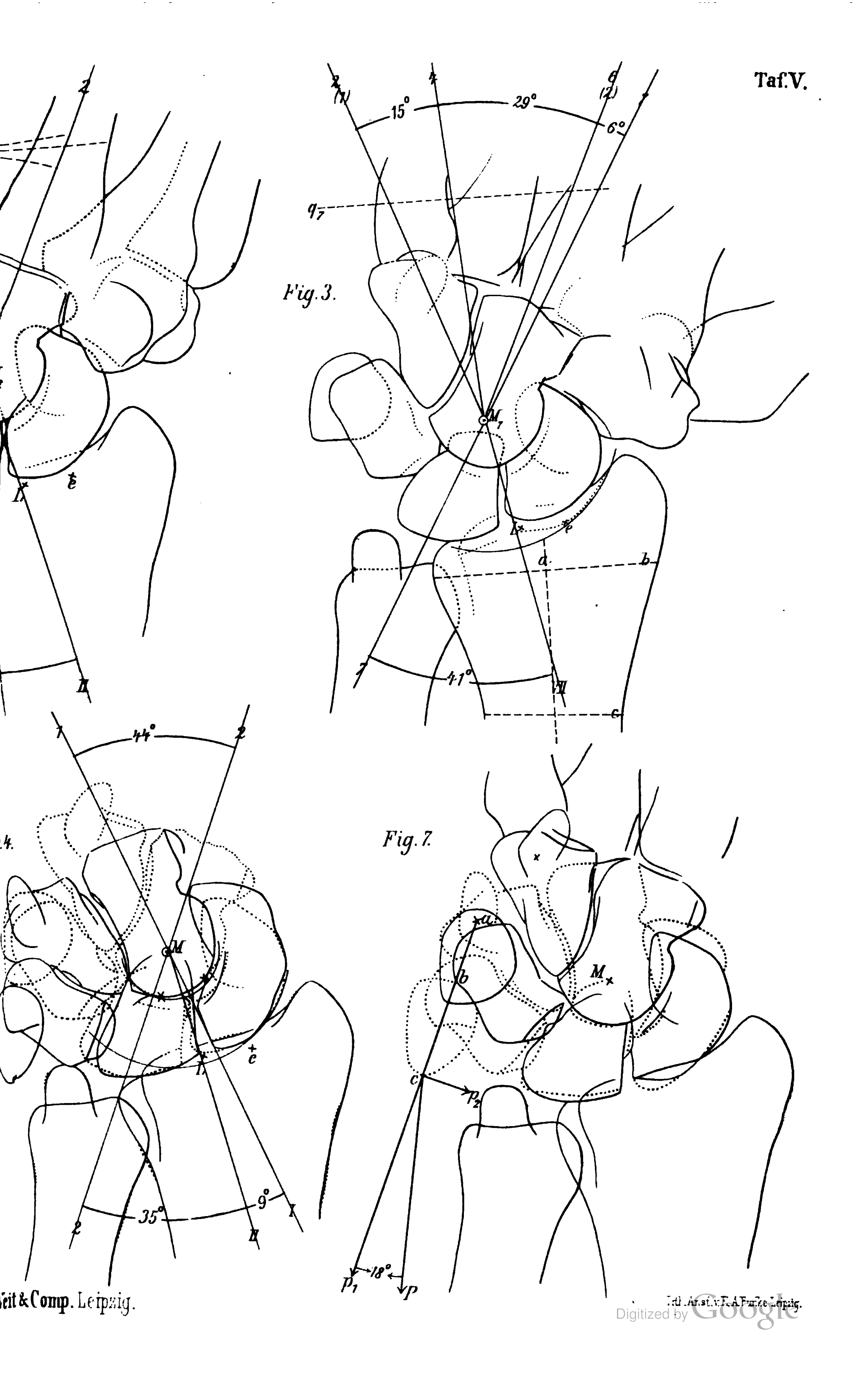


...F. E. Funke Leipzig

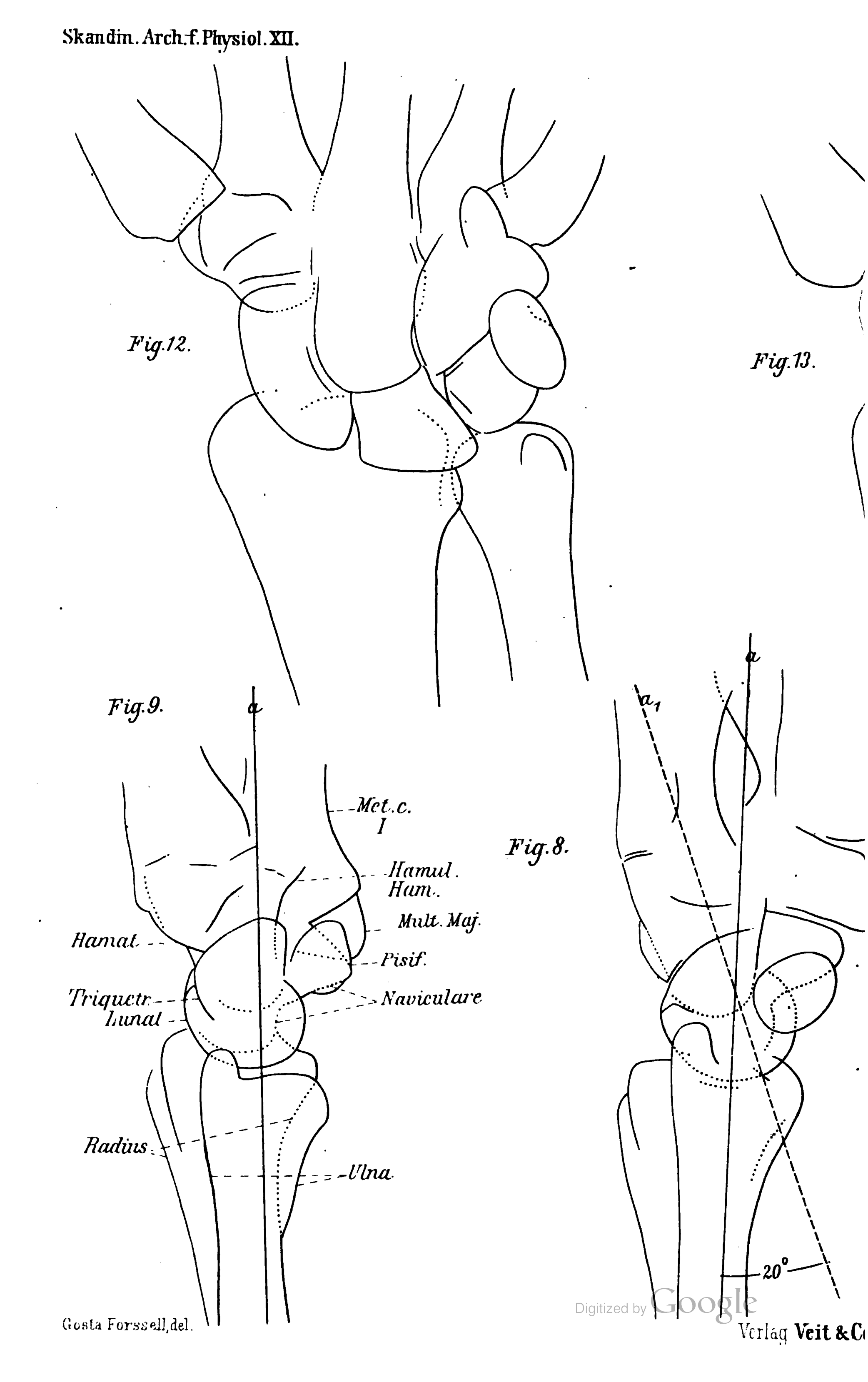


Gosta Forssell del

Verlag Veit

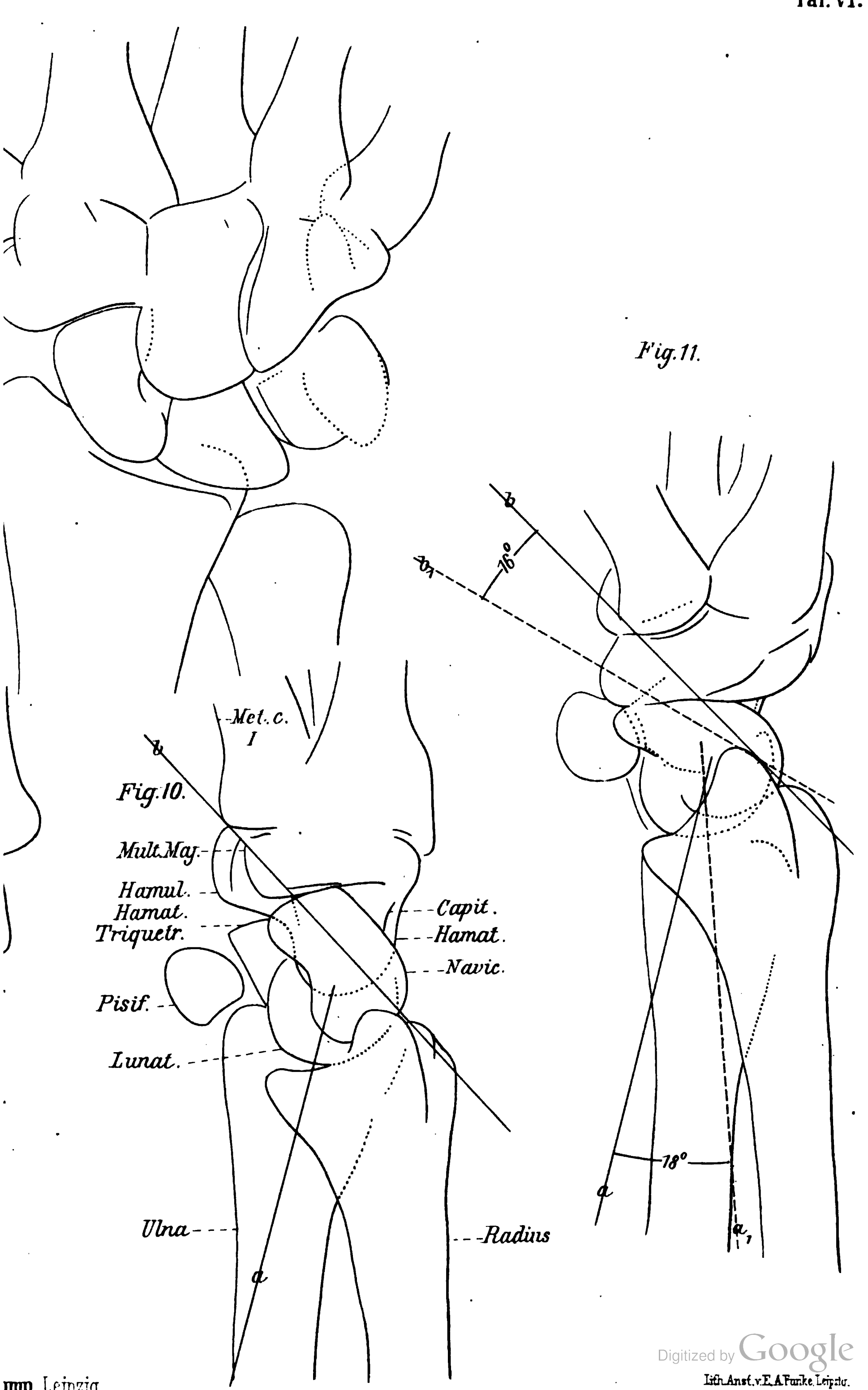


eit & Comp. Leipzig.
Lith. Anst. v. F. A. Funke, Leipzig.



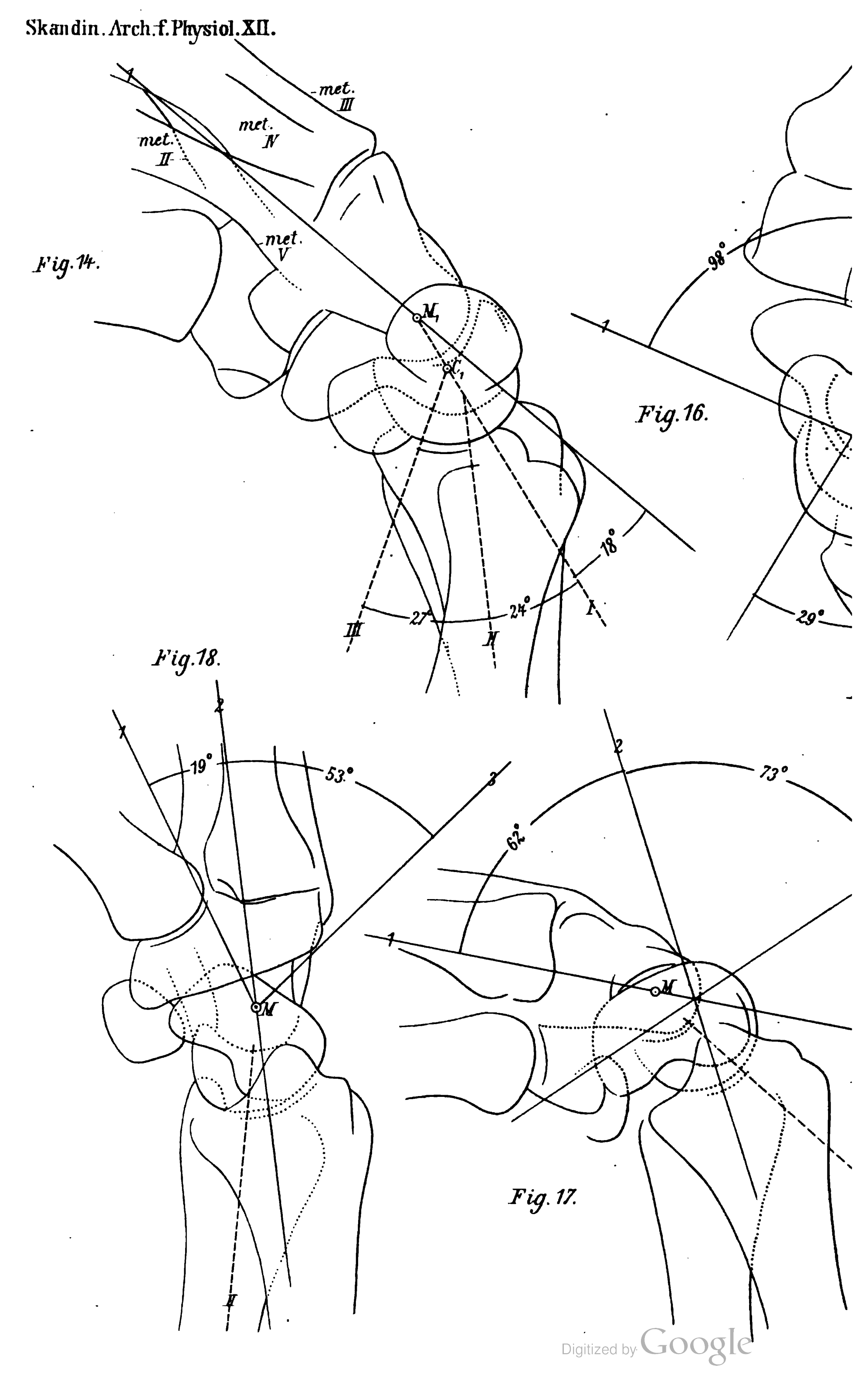
Gosta Forssell, del.

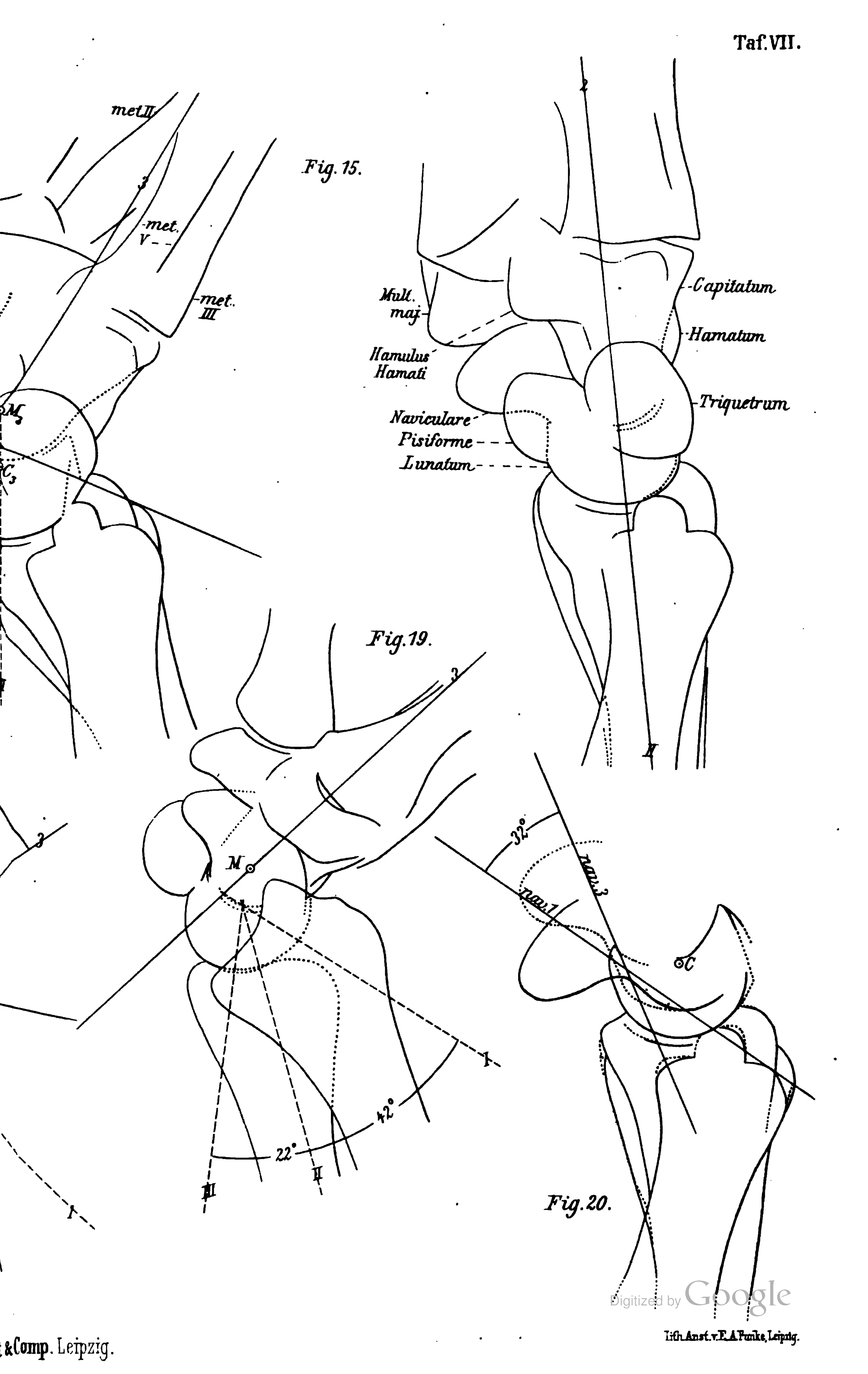
Verlag Veit & C



mp. Leipzig.

Lith. Anst. v. E. A. Funke, Leipzig.


met. III
met. IV
met. II
met. V
Fig. 14.
M₁
C₁
18°
24°
27°
I
IV
III
Fig. 16.
98°
29°
1
Fig. 18.
19°
53°
1
2
3
M
II
Fig. 17.
73°
62°
1
2
M



& Comp. Leipzig.

Lith. Anst. v. E. A. Funke, Leipzig.

Einige Versuche über die Wirkung des Coffeïns auf das Herz des Kaninchens,

sowie ein Vergleich zwischen der Coffeïn- und der Digitalinwirkung.[1]

Von

C. G. Santesson.

(Aus der pharmakologischen Abtheilung des Carolinischen Instituts zu Stockholm.)

(Hierzu Taf. VIII u. IX.)

1. Einleitung.

Die Wirkung des Coffeïns auf das Herz ist von zahlreichen Forschern sowohl an Kalt-, wie an Warmblütern genau studirt worden, und in den letzten Jahren haben Hedbom[2] und J. Bock[3] den Einfluss desselben auf in verschiedener Weise arbeitende isolirte Säugethierherzen untersucht. In Bezug auf die ältere Litteratur über den Gegenstand kann ich im Ganzen auf diese Arbeiten verweisen und nur das für meine Aufgabe Nothwendige hier nochmals in Erinnerung bringen.

Der Anlass dazu, dass ich die Frage über die Wirkung des Coffeïns

---

[1] Der Redaction am 10. September 1901 zugegangen.

[2] K. Hedbom, *Dies. Archiv.* 1899. Bd. IX. S. 1.

[3] J. Bock, *Arch. f. exp. Path. u. Pharm.* 1900. Bd. XLIII. S. 367 bis 399. — Dänisch in *Oversigt over det kgl. danske Videnskabernes Selskabs Forhandlinger.* 1899. Nr. 6. S. 615 bis 653.

auf das Säugerherz wieder aufgenommen habe, lag darin, dass die Versuche an isolirten Herzen zum Theil von einander abweichende Resultate gegeben haben, und dies zwar in einem Punkt, der für die Verwendung des Coffeïns als Arzneimittel bei Herzkrankheiten von Bedeutung ist. Einerseits wurde darin ein die Leistungen des Herzens stärkendes Mittel gesehen — die Praktiker fangen ja auch an, das Coffeïn als ein „Herztonicum“ zu betrachten[1] — andererseits wurde dasselbe als ein die Leistungen die Herzmuskels im Ganzen schwächendes Gift dargestellt. Es schien mir unter diesen Umständen geboten, zu versuchen, den Einfluss auf das Herz *in situ*, in Verbindung mit Gefässen und Nervensystem, nach einer Methode zu studiren, die eine etwas mehr eingehende Controle als die einfachen Blutdruckversuche ermöglicht. Die Resultate der eben erwähnten früheren Untersuchungen sind mit Rücksicht auf die dabei benutzten Methoden unzweifelhaft, jede für sich, ganz richtig und von grossem Interesse; doch scheint mir für die richtige Auffassung der Coffeïn-Herzwirkung, wie sie am ganzen Thiere (und am Menschen) sich gestalten dürfte, noch etwas zu fehlen, einige ergänzende Versuche und Besprechungen nicht ganz überflüssig zu sein.

Ehe ich auf die von mir benutzte Methode und meine eigenen Versuche übergehe, werde ich zuerst die oben besprochene Differenz der Resultate und Anschauungen früherer Forscher etwas näher besprechen. Hedbom, der mit dem Langendorff'schen Apparate arbeitete, also die Contractionen eines mit leeren Cavitäten beinahe widerstandslos arbeitenden Herzens unter Durchströmung der Coronargefässe mit Blut aufschrieb, kam zu dem Resultate, dass das Coffeïn sowohl die Pulsfrequenz, als auch die „Amplituden“ des Herzens vergrösserte, oft die Coronarcirculation beschleunigte, meistens eine schlechte Herzthätigkeit besserte, mit einem Worte, einen in allen Richtungen günstigen Einfluss auf das Herz ausübte.

Bock kam, wie oben schon angedeutet, bei seinen Versuchen zu einem theilweise hiervon abweichenden Ergebniss. Das nach seiner bekannten Methode[2] präparirte Herz arbeitet mit Blut in seinen Cavitäten; das Blut wird in den Lungen wie gewöhnlich arterialisirt; Coronarcirculation ist natürlich auch vorhanden; der grosse Kreislauf

[1] Für das nahestehende Theobromin (Diuretin) ist diese Auffassung z. B. von J. Pawinski auf Grund klinischer Beobachtungen geltend gemacht worden. *Zeitschr. f. klin. Med.* 1894. Bd. XXIV. S. 315.

[2] J. Bock, *Arch. f. exp. Path. u. Pharm.* 1898. Bd. XLI. S. 158.



ist von einem Apparate ersetzt, der dem vom Herzen kommenden Blute einen so grossen Widerstand leistet, dass ein ungefähr normaler Druck — in dem einen Carotis gemessen — unterhalten wird. Der Widerstand bleibt unverändert; der arterielle Druck hängt also von der Herzarbeit allein ab. Der venöse Zuflussdruck ist ein sehr niedriger und nahezu constanter; eine erwähnenswerthe Veränderung der Strombahn des kleinen Kreislaufs kommt also nicht vor. Der Einfluss des Centralnervensystems auf das Herz ist aufgehoben. Die Blutdruckcurve giebt unmittelbar die Pulsfrequenz; diese, mit der Druckhöhe verglichen, lässt Schlüsse auf die Pulsvolumina ziehen.

Mit dieser Methode, deren Grundzüge ich hier wieder zum besseren Verständniss der folgenden Darstellung kurz in Erinnerung bringen musste, gelangte Bock zu folgenden Resultaten: die Frequenz wurde durch das Coffeïn immer gesteigert, der Blutdruck, zuweilen (bei kleinen Gaben) anfangs etwas erhöht, sonst im Wesentlichen mehr oder weniger stark herabgesetzt. Kleine Gaben von Strophantin konnten nachher, sogar ohne die Pulszahl herabzusetzen (vgl. Vers. II)[1], den Blutdruck wieder in die Höhe bringen.

Was die Steigerung der Pulszahl betrifft, spricht Bock auf Grund der Versuche früherer Forscher (Johannsen, Wagner) über den Einfluss von Vagusreizung und Atropinisirung die Meinung aus, dass sie nicht auf einer Vaguslähmung, sondern auf einer Reizung der accelerirenden, nervösen Apparate des Herzens beruht. Hiermit stimmt Hedbom's Resultat gut überein, wenn er sich auch nicht über die (nervöse oder musculäre) Natur dieser Wirkung des Giftes äussert.

Die Pulsvolumina wurden aber in Bock's Versuchen durchgehends herabgesetzt. Die zuweilen anfangs beobachtete geringe Blutdrucksteigerung hing, wie Bock hervorhebt, sicherlich nicht von einer Vergrösserung der Pulse, sondern von einer Steigerung der Frequenz bei noch nicht stärker verminderten Pulsvolumina ab. Diesen ungünstigen Einfluss auf die Herzleistung schreibt Bock auf Rechnung einer directen Muskelwirkung des Coffeïns, welches — im Gegensatz zu den Stoffen der Digitalinreihe — die „Elasticität" des Herzmuskels, vor Allem seine diastolische Dehnbarkeit, herabsetzen soll; und er weist in diesem Zusammenhange auf die von Johannsen entdeckte, starremachende Wirkung des Coffeïns auf die Substanz der

[1] J. Bock, *Arch. f. exp. Path. u. Pharm.* 1900. Bd. XLIII. S. 372 bis 378.

Skeletmuskeln und des Herzmuskels beim Frosch hin. Bock hebt mit Recht hervor, dass, da bei seiner Methode die Herzen unter viel günstigeren, mehr physiologischen Verhältnissen als Hedbom's Präparate gearbeitet haben, sicherlich auch seine eigenen Resulate ein naturgetreueres Bild der Herzwirkung des Coffeïns geben dürften.

Diese letzte Meinung scheint auf unzweifelhaft richtige Voraussetzungen begründet zu sein. Und doch sprechen gewisse andere Beobachtungen dafür, dass die Ergebnisse Hedbom's, da er eine Steigerung der „Amplituden" des Coffeïnherzens beobachtete, nicht ganz ohne Interesse waren. So wies bekanntlich Dreser[1] an Skelettmuskeln des Frosches nach, dass kleine Coffeïngaben die Dehnbarkeit des ruhenden Muskels steigerte, die absolute Kraft und die Arbeitsleistung desselben bedeutend erhöhte. Für das Froschherz zeigte derselbe Forscher[2] dass das Coffeïn sowohl die absolute Kraft steigerte, als auch die Pulsvolumina etwas grösser machte. Damit ist kein Beweis dafür geliefert, dass nicht das Gift die Leistungsfähigkeit des Säugerherzmuskels herabsetzen kann. Andererseits erwecken diese Thatsachen den Gedanken, dass das für die Coffeïnwirkung ungünstige Resultat Bock's doch vielleicht aus den dabei herrschenden physikalischen Bedingungen sich ableiten liesse und nicht unter allen Umständen, für ganze Thiere mit veränderlichem Widerstand der Gefässe und unter Controle des Centralnervensystems in aller Strenge gültig sein dürfte.

Eine mittlere Stellung nimmt Cushny[3] ein. Nach ihm hat das Coffeïn an sich bei Säugerherzen nur eine Pulsbeschleunigung, aber keine Veränderung der Pulsvolumina zur Folge. Die Steigerung der Pulszahl hängt von einer Muskelwirkung des Giftes ab: dieses steigert die Irritabilität des Herzmuskels — daher die grössere Pulsfrequenz, die auch nach Ueberschneiden der Acceleranten und nach vorheriger Atropinvergiftung mit der Zufuhr des Coffeïns hervortritt. Zufälliger Weise kann eine centrale Vagusreizung die Pulszahl mässigen oder sogar herabsetzen; gewöhnlich ist dies aber nicht der Fall. Die meistens hervortretende Steigerung der Pulsfrequenz ist nicht immer von einer Vergrösserung der in der Zeiteinheit ausgetriebenen Blutmengen begleitet (Verf. citirt hier Bock), obgleich dies oft der Fall ist. „Apparently the contractions of the ventricle follow each other so

---

[1] H. Dreser, *Arch. f. exp. Path. u. Pharm.* 1890. Bd. XXVII. S. 81 bis 83.

[2] Derselbe, *Ebenda.* 1887. Bd. XXIV. S. 283 u. flg.

[3] A. Cushny, *A textbook of pharmacology etc.* Second edition. 1900. S. 242 u. flg.



rapidly that the time is often insufficient for the inflow of the usual amount of blood.“ Die Steigerung des Blutdruckes nach Coffeïn hängt daher zum grössten Theil von der Wirkung auf die vasomotorischen Centren ab, „although not infrequently this is supplemented by an increased efficiency of the heart“. — Nach Cushny steigert doch thatsächlich das Coffeïn die Leistung des Herzens, indem dasselbe dazu gebracht wird, gleich grosse Pulse wie vorher, aber in grösserer Anzahl pro Minute und gegen einen stärkeren Widerstand auszuführen,

Ein von den Versuchen Bock's (Vers. XV)[1] ist hier von Interesse. Ein Kaninchenherz zeigte im Bock'schen Apparate nach Zufuhr von Coffeïn die bei seinen Versuchen gewöhnlichen Erscheinungen: schnelleren Puls und Herabsetzung des Blutdruckes. Dann wurde der Widerstand im Apparat (einer Gefässcontraction im grossen Kreislauf entsprechend) gesteigert. Sofort stieg der Druck, sogar etwas höher als vor der Vergiftung; die Pulszahl blieb unverändert, die absolute Kraft des Herzens war ein wenig niedriger als im Anfang des Versuches.

Zwar geht aus diesem Versuche kein besonders günstiger Einfluss des Coffeïns hervor, denn die grössere Leistung des Herzens, welche hier nach Steigerung des Widerstandes hervortrat, hing von dieser und nicht vom Gifte ab. Es ist doch bemerkenswerth, dass das Herz, trotz der Einwirkung des Coffeïns, das an sich die Pulsvolumina herabsetzen soll, dessen ungeachtet bei gesteigertem Widerstande einer bedeutend grösseren Leistung fähig ist. Es lässt sich allerdings nicht sagen, ob nicht das unvergiftete Herz bei Steigerung des Widerstandes einen noch höheren Blutdruck hervorgebracht hätte. Andererseits erweckt der hier eben besprochene Versuch bei mir den Gedanken, dass vielleicht die von Bock als Wirkung des Coffeïns immer beobachtete Herabsetzung der Pulsvolumina (und dadurch des Blutdruckes) weniger von einem functionserniedrigenden Einfluss des Giftes auf den Herzmuskel, als davon abhängen könnte, dass das Herz bei Beschleunigung des Pulses ohne gleichzeitige Erhöhung des Widerstandes (und ohne einem besonders kräftigen, pulsvergrössernden Irritamente, denn ein solches scheint das Coffeïn kaum zu sein), durch die zeitlichen und mechanischen Bedingungen seiner Thätigkeit an sich dazu gebracht wird, kleinere Pulsvolumina auszuführen.

Wenn das normale Herz bei einer mässigen Pulsfrequenz und gegen einen geeigneten Widerstand arbeitet, führt es sicherlich eine verhältnissmässig grosse Leistung aus, und man darf kaum erwarten,

1 J. Bock, *Arch. f. exp. Path. u. Pharm.* 1900. Bd. XLIII. S. 396.

dass dasselbe bei bedeutender Beschleunigung des Pulses so grosse Volumina entleeren wird, dass dadurch der Druck sich unverändert hält oder geradezu steigt; denn das Organ findet dann — wie Cushny schon andeutet (siehe oben) — nicht mehr die nöthige Zeit, genügend grosse Pulsationen auszuführen. Nur wenn gleichzeitig der Widerstand (binnen gewissen Grenzen) gesteigert worden ist, wird der Herzmuskel durch die dabei stattfindende stärkere Dehnung unter Mitwirkung des Giftes, das die Contraction des Herzmuskels begünstigt, zu einer mehr energischen Thätigkeit — zu schnelleren und doch mehr ausgiebigen Bewegungen — gebracht. Das Coffeïn scheint doch andererseits nicht eine Steigerung der Herzleistung bei zunehmendem Widerstand zu verhindern. Es ist ja übrigens auch mit dem Digitalis der Fall, dass es in kleinen und mässigen Gaben vollkommen normal arbeitende Herzen nur wenig beeinflusst und erst unter pathologischen Verhältnissen seine charakteristischen Wirkungen recht entfaltet. Es könnte wohl mit dem Coffeïn sich gewissermaassen ähnlich verhalten. An ganzen Thieren (oder Menschen) ist nicht selten bei der Coffeïnwirkung eine Vagusreizung mit im Spiel, die die Pulsbeschleunigung mässigen und dadurch eine ausgiebigere Herzaction ermöglichen kann — ein Faktor, der auch von Bedeutung sein dürfte. Um diese Verhältnisse etwas zu beleuchten, sind die unten zu beschreibenden Versuche ausgeführt.

Die Frage dagegen, ob das Coffeïn auf das Herz an sich, unabhängig von der stattfindenden Blutdrucksteigerung, so einwirkt, dass die Pulsvolumina dadurch gesteigert werden, habe ich — wie ich unten näher erörtern werde — mit der von mir benutzten Methode nicht bestimmt in der einen oder in der anderen Richtung entscheiden können; die Antwort derselben muss sicherlich, je nach den verschiedenen mechanischen Bedingungen, verschieden ausfallen. Die Aufgabe meiner Versuche habe ich eher darin gesehen, dass ich ermitteln wollte, inwieweit das Herz unter dem Einflusse des Coffeïns den durch die Blutdrucksteigerung gestellten grösseren Anforderungen entsprechen kann. Diese Aufgabe scheint mir von grosser Bedeutung zu sein; denn darin liegt die Entscheidung der Frage: ist das Coffeïn ein „Herztonicum“. Zwar haben viele Praktiker auf Grund von Erfahrungen am Krankenbette, ihrer Ansicht nach, klinisch diese Frage schon erledigt. Es dürfte doch nicht ganz ohne Interesse und Werth sein, derselben auch experimentell nachzugehen.

2. Die Versuchsmethode.

Wie oben schon angedeutet, wollte ich die Wirkung des Coffeïns auf Säugethierherzen untersuchen, die mit Gefäss- und Nervensystem wie gewöhnlich in Verbindung standen, und zwar mittels einer Methode, die, menn möglich, nähere Schlüsse über den Zustand des Herzens als die einfachen Blutdruckversuche gestatten möchte. Ich habe zu diesem Zwecke das von Johansson und Tigerstedt[1] früher für das Studium der gegenseitigen Beziehungen des Herzens und der Gefässe angewandte Verfahren gebraucht, nämlich das Pericardium als Pletysmograph benutzt, mit Hülfe des Pistonrecorders von Ellis die Volumveränderungen der intrapericardialen Organe registrirt und gleichzeitig auch den Blutdruck in gewöhnlicher Weise aufgezeichnet. Die Absicht war, dass man mit Hülfe der Recordercurve gewisse Schlüsse über die Grösse der Herzcontractionen und über den Füllungsgrad des Herzens vor und während der Giftwirkung ziehen könnte.

Zwar wusste ich wohl, dass die Anwendung dieser Methode und die Beurtheilung der Resultate mit grossen Schwierigkeiten verbunden war: die nöthigen Operationen sind eingreifend und die Recordercurve schwer zu deuten. Doch war es ja immerhin möglich, dass die Versuche die aufgeworfene Frage in aufklärender Weise beleuchten könnten.

Die pericardial-pletysmographische Curve haben Johansson und Tigerstedt näher besprochen und analysirt, und sind dabei zu dem Resultate gekommen, dass man bei richtig ausgeführten Versuchen daraus gewisse Schlüsse in Bezug auf die Herzarbeit ziehen kann; vor Allem lässt sich bis zu gewissem Grade controliren, ob das Herz mehr oder weniger Blut austreibt wie vorher, sowie ob eine grössere oder geringere Blutmenge an der Höhe der Diastole im Herzen zurückbleibt (ob „Stase" im Herzen sich entwickelt). Sowohl die Grösse der Recorderpulse, als auch ihre Entfernung von der Abscisse sind dabei zu berücksichtigen. Das Ergebniss der Analyse der erwähnten Forscher lässt sich etwa in folgenden Punkten zusammenfassen:

1. Wenn bei steigendem Widerstande Seitens der Gefässe (bei Erhöhung des Blutdruckes, für sich gemessen) die Volumvariationen der Recordercurve grösser werden (während meistens gleichzeitig die ganze

[1] J. E. Johansson und R. Tigerstedt, *dies. Archiv.* 1889. Bd. I. S. 331 bis 342, besonders S. 342 bis 351, sowie 1891. Bd. II. S. 409 u. flg. Siehe ebenda die ältere Litteratur über die Pletysmographie des Säugethierherzens.

Curve sich von der Abscisse entfernt), lässt sich daraus der Schluss ziehen, dass das Herz mehr Blut als vorher aus dem Pericardialraum austreibt; doch kann zu gleicher Zeit eine gewisse „Stase“ im Herzen sich entwickeln. Wie sich die Volumina der einzelnen Pulse verhalten, hängt von der Pulsfrequenz ab.

2. Wenn bei steigendem Widerstande Seitens der Gefässe die Recorderpulse gleich bleiben, treibt zwar das Herz mehr Blut wie vorher aus — doch ist dabei sicher zunehmende „Stase“ vorhanden.

3. Wenn bei steigendem Widerstande Seitens der Gefässe die Recorderpulse zwar abnehmen, doch die Abnahme (absolut) geringer ist, als die Entfernung der „diastolischen Linie“ [1] von der Abscisse zunimmt, so treibt das Herz mehr Blut wie vorher aus.

4. Wenn dagegen die „diastolische Linie“ sich weniger von der Abscisse entfernt als die Recorderpulse abnehmen, wird weniger Blut aus dem Herzen herausgetrieben.

5. Wenn die ganze Recordercurve sich von der Abscisse entfernt und ihre Pulsationen gleichzeitig kleiner werden, nimmt die „Stase“ im Herzen (Pericardialraume) zu.

An normalen Thieren (Kaninchen) kamen Johansson und Tigerstedt mit der erwähnten pletysmographischen Methode in Bezug auf die gegenseitige Beziehung des Herzens und der Gefässe zu folgenden Schlüssen:

1. Wenn der Druck mässig steigt, treibt das Herz mehr Blut wie vorher aus; wird die Druckerhöhung bedeutend, nimmt dagegen die ausgeworfene Blutmenge ab.

2. Eine geringe Drucksteigerung kann ohne „Stase“ im Herzen stattfinden; oft — und bei grösserer Druckerhöhung immer — bildet sich doch eine mehr oder weniger bedeutende „Stase“ aus.

3. Bei steigendem Blutdruck hebt sich die ganze Recordercurve von der Abscisse empor, woraus hervorgeht, dass die intrapericardialen Organe stärker mit Blut gefüllt werden. Dies hängt davon ab, dass die Gefässcontraction den Rückfluss des Blutes zum Herzen befördert. In erster Linie beruht die Volumzunahme der intrapericardialen Organe auf einer grösseren Blutfüllung der rechten Herzhälfte. Da gleichzeitig meistens nicht nur die „diastolische“, sondern auch die „systolische Linie“ sich von der Abscisse entfernt, hängt das zunächst davon ab, dass die rechte Kammer nicht sofort im Stande ist, die grössere

[1] Die „diastolische Linie“ entsteht durch Verbindung der höchsten Endpunkte der Recorderpulsationen; die aufsteigenden Curventheile bezeichnen nämlich die Diastole, die herabsteigenden die Systole.



Blutmenge auszutreiben; ihre Pulsvolumina können jedoch gesteigert sein. Bald füllt sich aber auch die linke Herzhälfte stärker, und das Blut vertheilt sich mehr gleichmässig innerhalb des Herzens. Wenn aber der Druck immer mehr steigt, nähert er sich einer Grenze, wo die ausgeworfenen Blutmengen abnehmen und die „Stase“ im Herzen dahin gesteigert wird, dass in der Regel der Blutdruck nicht mehr in die Höhe getrieben werden kann. Ehe diese regulirende Herabsetzung der Herzleistung eintritt, sind doch meistens bei Steigerung des Blutdruckes die ausgetriebenen Blutmengen vergrössert.

Nachdem ich hiermit nach Johansson und Tigerstedt kurz angedeutet habe, was die Pericardialpletysmographie unter gleichzeitigem Messen des Blutdruckes geben kann und an normalen Thieren gegeben hat, müssen wir noch einen, in methodischer Hinsicht schweren Punkt berücksichtigen. Der Pericardialraum ist nicht von festen Wänden begrenzt; vor Allem können diese durch die Bewegungen der Lungen verschoben und dadurch die pletysmographische Curve beeinflusst werden. Um diesen Fehler zu vermeiden, haben Johansson und Tigerstedt bei einem Theile ihrer Versuche eine geeignet geformte Metallplatte zwischen Pericardium und Lungen hineingeschoben. Für gewisse Zwecke haben sie doch diese Complication der Versuchstechnik unnöthig gefunden. Ich habe bei meinen Versuchen die Platte nicht benutzt; und ich habe mich davon überzeugen können, dass der directe Einfluss der Lungenbewegungen, d. h. die durch Druck und Zug der Lungen von aussen her hervorgerufenen Volumveränderungen des Pericardialraumes, thatsächlich sehr gering ist. Dagegen wirken die Athembewegungen — wie auch Johansson und Tigerstedt bei Versuchen mit Anwendung der erwähnten Platte beobachtet haben — in anderer Art sehr deutlich auf die Form der Recordercurven ein, indem sie den Blutstrom durch die Lungen beeinflussen; das lässt sich aber natürlich nicht vermeiden. Wie die (künstliche) Respiration (die Lungenaufblähung) die Recorderpulse verändert, geht aus nachstehender Curve (Fig. 1) hervor, wo bei Unterbrechung der künstlichen Athmung nur die Herzbewegungen aufgezeichnet wurden.

Dass nicht nur die künstliche Respiration, sondern auch die spontane ähnliche Veränderungen der pericardial-pletysmographischen Curve hervorriefen, hatte ich auch Gelegenheit zu beobachten, da meine Thiere nicht curarisirt waren und ich nach Einbindung der Pericardialcanüle meistens den Brustkasten verschloss (siehe unten), so dass spontane Athmung möglich war und auch zuweilen nach Unterbrechung der künstlichen Athmung thatsächlich eintrat. Fig. 2 *b* und *c* zeigt

eine solche Recordercurve, die während einer Periode von spontaner Athmung gezeichnet wurde.

Wie wenig die Lungenaufblähung an sich — von ihrem Einfluss

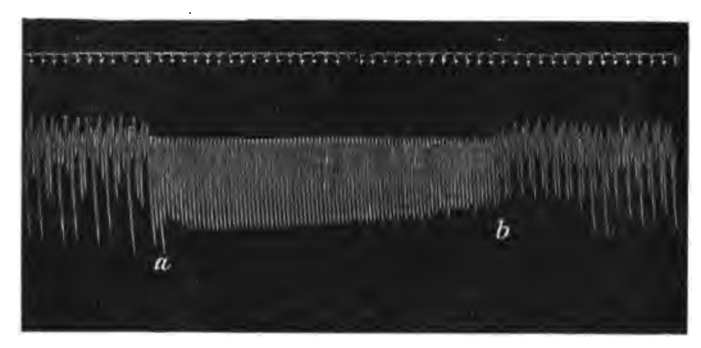


Fig. 1. [Vers. III, Observ. 5, S. 277]. Einfluss der Lungenaufblähung auf die Recordercurve. Bei *a* wurde die künstliche Athmung ausgeschaltet (Apnoë; kein Curare), bei *b* wieder in Gang gesetzt.

auf den Blutstrom abgesehen — auf die Recordercurve einwirkte, geht aus mehreren meiner Beobachtungen hervor, indem ich am Ende der

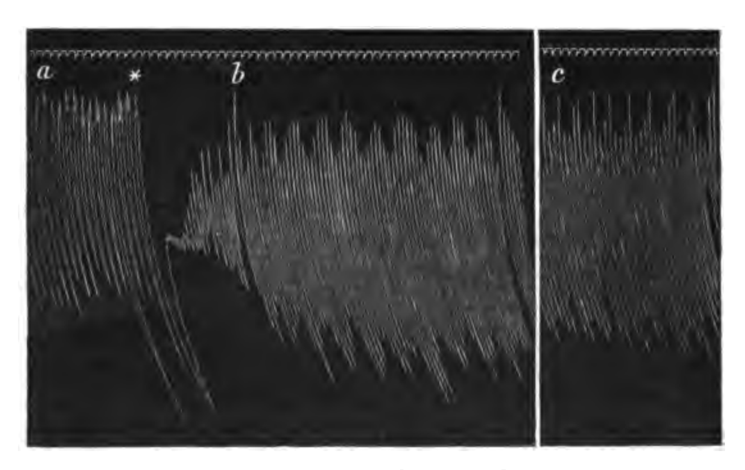


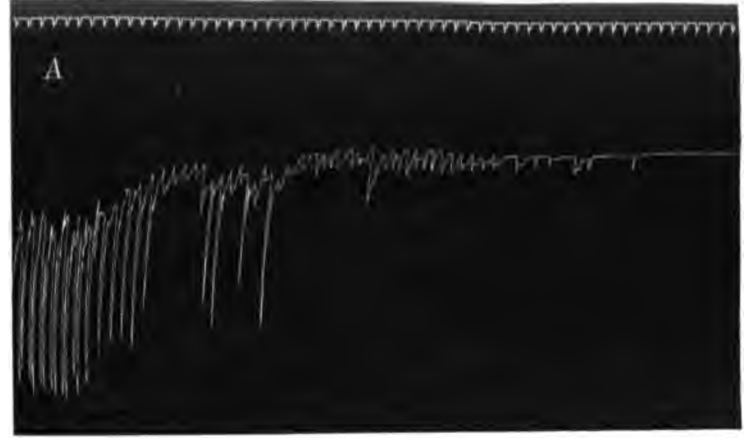
Fig. 2. [Vers. III, Observ. 34, 35 u. 37, S. 279]. Respiratorische Variationen der Recordercurve. *a* Künstliche Athmung; bei * wird diese unterbrochen; bei *b* setzt spontane Athmung ein; *c* (später) fortwährend spontane Athmung — mehr ausgeprägte respiratorische Variationen. (Die Curven sind um ein Drittel verkleinert.)

Versuche meine Herzen unter Fortsetzung der künstlichen Athmung mit einem Gift — Cyankalium, Helleboreïn, Digitalin oder Strophantin — in kurzer Zeit zum Stillstand brachte. Die Pulsationen der

Recordercurve nahmen dabei schnell ab, und wenn das Herz nicht mehr arbeitete, zeichnete der Recorder beinahe eine gerade Linie oder nur sehr kleine, den Blähungen der Pumpe entsprechende Variationen. Da das Herz durch Cyankalium gelähmt wurde, konnte man sich denken, dass das enorm angeschwollene Organ den ganzen Pericardialraum ausfüllen und vielleicht sogar die Oeffnung der Canüle zustopfen könnte. Dies war bei Vergiftung mit Strophantin, Digitalin oder Helleboreïn wahrscheinlich nicht der Fall, da diese Gifte bekanntlich meistens anfangs einen systolischen oder halbsystolischen Stillstand hervorbringen, welcher nur allmählich einer Erschlaffung Platz macht. Die folgenden Curven (Fig. 3) zeigen Beispiele des hier besprochenen Verhaltens.

Unter Umständen pressen also die Lungen bei ihrer Aufblähung ein wenig auf den Pericardialraum; mehrmals konnte ich aber nach Stillstand des Herzens keine Spur der regelmässigen respiratorischen Variationen entdecken. Der directe Einfluss der Lungenbewegungen auf den Pericardialraum schien also in meinen Versuchen ein sehr geringer zu sein oder ganz zu fehlen. Ich schliesse daraus, dass die oft sehr bedeutenden respiratorischen Variationen der Recordercurve, welche während der Thätigkeit des Herzens beobachtet wurden, zum grössten Theile davon abhingen, dass der Blutstrom in den Lungen durch die Aufblähungen (oder die spontanen Athmungsbewegungen) dieser Organe beeinflusst wurde. Das Pericardium scheint somit als ein recht zuverlässiger Pletysmograph zu dienen; es dürfte also erlaubt sein, der Recordercurve ein gewisses Vertrauen zu widmen.

Nach diesen Besprechungen der Methode gehe ich dazu über, die Präparation zu beschreiben. Die gewogenen Thiere (Kaninchen) wurden mit Aether narcotisirt, dann Tracheotomie ausgeführt, Canüle in V. jugul. ext. sin. und in A. carotis dext. eingebunden. Nachher wurden mit Thermocauterium die Haut der Brust und die Pectoralismuskeln wegpräparirt, das Sternum von dem abgebrochenen Schwertfortsatze her nach oben mit einer starken Schere durchschnitten. Das Manubrium wurde doch nicht vollständig gespalten. Die Blutung war meistens mässig stark und blieb bald stehen, nachdem die Mammargefässe oben von der Sternalspalte aus in Massenligaturen gefasst worden waren. Meistens wurde jetzt künstliche Athmung eingeleitet. Die niederen Theile des Brustkastens, der Spalte entlang, wurden von den Weichgebilden des Mediastinum anterius vorsichtig losgelöst und mittels zweier Fäden nach den Seiten gezogen. Dann wurde die vordere untere Spitze des Pericardiums mit zwei nahe neben einander





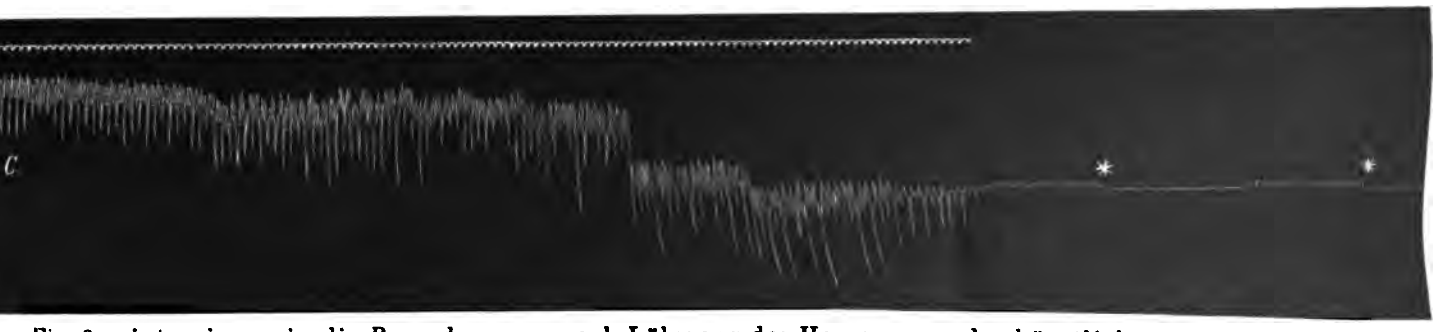


Fig. 3 zeigt, wie wenig die Recordercurve nach Lähmung des Herzens von der künstlichen Athmung beeinflusst wird. *A* [Vers. IV, Ende, S. 281] Cyankalium; das Herz schwillt stark an. *B* [Vers. I, Observ. 32, S. 275] Digitalinum pur. amorph. (Merck); das Herz schwillt kaum an. *C* [Vers. VI, Observ. 31, S. 284] Helleboreïn (Merck); das Herz zieht sich stark zusammen; nach Aufhören der Herzschläge zeigt noch die Curve kleine respiratorische Variationen, welche aufhören, wenn die künstliche Athmung ausgeschaltet wird (*). Fig. 3 *C* ist zu 1/3 der natürlichen Grösse reducirt.

angelegten Arterienpincetten gefasst, eine feste Ligatur rund um dieselben lose angebracht (ohne zuzuziehen), das Pericardium zwischen den Pincetten mit einer kleinen Scheere gespalten, eine Glascanüle — wie Johansson und Tigerstedt sie abgebildet haben — in den Pericardialraum eingeführt und die erwähnte starke Ligatur zugezogen. Oft wurde diese durch eine zweite, etwas tiefer angelegte Ligatur verstärkt, ehe die Pincetten entfernt wurden.

Wenn die Einbindung der Pericardialcanüle ausgeführt worden war, wurden meistens die beiden Hälften des Brustkastens wieder an einander angelegt und zusammengebunden. Die Pericardialcanüle ragte, dem Bauche entlang, aus dem unteren Ende der Brustwunde hinaus und lag in dieser Stellung so ziemlich fixirt. Sie wurde nachher mit dem Pistonrecorder verbunden. Zuletzt wurde die Carotiscanüle mit einem Quecksilbermanometer in Verbindung gesetzt, um in gewöhnlicher Weise den Blutdruck zu registriren. Der Recorder schrieb an die Trommel eines Ludwig-Baltzar'schen Registrirapparates, von der Blutdruckcurve gesondert, seine Pulsationen auf. Die Zeit (Secunden) wurde an beiden Curven von derselben Uhr gezeichnet und „correspondirende Punkte" oft notirt.

In den Versuchen von Johansson und Tigerstedt wurde ein Theil des Brustkastens entfernt, die Pericardialcanüle etwas in die Höhe gehoben, so dass das Pericardium gespannt wurde, und dann in dieser Stellung fixirt. An curarisirten Thieren war diese Anordnung möglich und bot grosse Sicherheit gegen zufällige Verschiebungen dar. Ich wollte aber am liebsten das Curare vermeiden, da ich die Wirkungen eines anderen Giftes, des Coffeïns, zu untersuchen wünschte, und bei meinen Thieren waren also zufällige Bewegungen, vielleicht sogar krampfhafte Zuckungen zu erwarten. Es war mir daher unmöglich, die Canüle unbeweglich zu fixiren: sie musste, so weit thunlich, den Bewegungen des Thieres, die immerhin nie sehr ausgiebig waren, folgen können. Ich glaube, dass ich mittels der oben beschriebenen Anordnung dieses Ziel ziemlich gut erreicht habe. Kleine Verschiebungen könnten allerdings vorkommen und unter Umständen bedeutende Veränderungen der Lageverhältnisse im Herzbeutel, sowie der Uebertragung der Volumvariationen hervorbringen; sie wären doch sicher sofort an der Recordercurve zu controliren. Einige Male sind plötzliche Veränderungen des Aussehens dieser Curve thatsächlich beobachtet — sie hingen vielleicht in gewissen Fällen von solchen Verschiebungen der Canüle ab; sie können doch nie für Wirkungen des Coffeïns gehalten werden. Zwischen denjenigen Theilen eines Versuches, die zunächst mit einander verglichen werden, um den Einfluss einer

Giftinjection zu ermitteln, dürfen natürlich keine solchen Sprünge stattgefunden haben.

Die Giftlösungen wurden in V. jugul. ext. eingespritzt. Von dem benutzten Coffeïnpräparate, Coffeïn. natrico-benzoicum, wurde eine 0·5 procent. wässerige Lösung mit 0·9 Proc. Kochsalz verwendet.

Die Versuche, zu denen ich jetzt übergehe, sind im Frühlingssemester 1901 in dem physiologischen Laboratorium des Carolinischen Instituts unter Assistenz von Herrn Cand. med. Esaias Cederlöw ausgeführt worden.

3. Eigene Versuche.

Wenn auch meine Versuche sämmtlich einen im Ganzen gleichartigen Verlauf aufweisen, muss ich doch, um eine Controle Anderer zu ermöglichen, dieselben ziemlich ausführlich hier mittheilen. Ich gebe daher für jeden einzelnen Versuch ein Protokoll mit Angabe der Pulsfrequenz (Columne *c*), des Blutdruckes (Col. *d*) und der Grösse der Recorderpulse, sowie mit nöthigen Notizen (Col. *i*) und mit zahlreichen Abbildungen der Recordercurven (siehe Tafel VIII und IX hinten). Was die Grösse der Recorderpulse betrifft, wechselt sie rhythmisch in hohem Masse meistens unter dem Einflusse der Respirationsbewegungen (siehe oben). Um einen Vergleich der verschiedenen Abschnitte dieser Curve zu erleichtern, ist zuerst die Höhe der grössten, regelmässig vorkommenden Recorderpulsationen unreducirt aufgeführt (Col. *e*); einzelne, noch grössere Excursionen sind zuweilen zwischen Klammern mitgetheilt. Die Vergrösserung des Recorders konnte nicht in allen Versuchen gleich gehalten werden, weil dieselbe, um Ausschläge geeigneter Grösse zu erhalten, in dem einen Falle eine bebedeutendere, in dem anderen eine geringere sein musste. Nachdem der Recorder im Anfang jedes Versuches eingestellt worden war, blieb er natürlich während des ganzen Versuches in derselben Stellung.

Dann wurde, um eine noch genauere Uebersicht der Veränderungen der Herzthätigkeit zu ermöglichen, an allen wichtigeren Punkten des Versuches die Mittelzahl der Höhen einer genügend grossen Gruppe (10 oder 20) einander folgender Recorderpulse (Col. *f*) bestimmt. Diese Werthe geben das genaueste (relative) Maass der Volumveränderungen der intrapericardialen Organe. Von absoluten Angaben (in Cubikcentimetern) muss ich absehen, weil ich die Vergrösserung des Recorders nicht jedesmal notirt habe. Für meinen Zweck ist dies auch gleichgültig.

Die Bestimmung dieser Mittelzahl ist nicht selten mit Schwierigkeit verbunden, indem die Curve neben grossen, deutlichen Variationen auch oft kleine Zacken und Unebenheiten aufweist, von denen man nicht sicher weiss, ob sie wirklichen Herzschlägen entsprechen oder nicht. Die Entscheidung dieser Frage ist aber natürlicher Weise für die Berechnung der Mittelzahl der Pulsgrössen von entscheidender Bedeutung. Ich habe daher in jedem etwa zweifelhaften Falle so verfahren, dass ich das Resultat der Pulsrechnung an der Recordercurve mit demjenigen verglichen, das ich an der gleichzeitig gezeichneten Blutdruckcurve meistens ziemlich genau bestimmen konnte. Wenn die Recordercurve richtig beurtheilt worden war, musste die daran bestimmte Pulsfrequenz mit der aus der Blutdruckcurve hervorgegangenen übereinstimmen. Kleine Differenzen waren natürlich unvermeidlich; wenn diese aber bedeutender waren (zu 10 bis 20 Einheiten oder darüber stiegen), war offenbar die Deutung der Recordercurve unrichtig; es müssten diese oder jene kleine Zacken mitgezählt bezw. weggelassen werden. In dieser Weise glaube ich; dass ich ziemlich genaue Mittelwerthe bekommen habe; ohne Berücksichtigung dieser Einzelheiten kann man dagegen sehr willkürliche oder sogar falsche Resultate bekommen.

Die Grösse der in der Zeiteinheit vom Herzen ausgeführten Arbeit hängt aber auch von der Pulsfrequenz ab. Mit Rücksicht darauf habe ich mir (relative) Werthe zu verschaffen gesucht, indem ich jedes Mal die mittlere Pulsgrösse mit dem gleichzeitig (an der Blutdruckcurve) abgelesenen Werthe der Pulsfrequenz multiplicirt habe (Col. *g*). Dass diese Zahlen, die „Minutenpulsgrössen", nur des Vergleiches halber dastehen und keine reelle Bedeutung haben, geht aus dem oben Gesagten klar hervor.

Endlich habe ich, nach dem Vorgange von Johansson und Tigerstedt, den Abstand der „diastolischen Linie" der Recordercurve von der Abscisse (oder richtiger einen Mittelwerth dieser Abstände für je 10 oder 20 Pulsationen) angegeben (Col. *h*), um auch diesen Anhaltspunkt zur Beurtheilung der Herzthätigkeit und der Blutbewegung im Pericardialraume zu gewinnen.

Nach den Versuchsprotokollen folgt eine übersichtliche Zusammenstellung und Besprechung der Ergebnisse.

Versuch I. 4. März 1901. Kaninchen, 1975 g. Die zuletzt eingespritzte Digitalinlösung war durch Auflösung von Digitalin. amorph. pur. (Merck), 0·5 pro mille, in physiol. Kochsalzlösung mit Hülfe von einigen Tropfen Alkohol und einer Spur Essigsäure hergestellt.

Nr. der Observat.	Zeit nach Anfang des Versuches in Minuten	Pulsfrequ. in 1 Min.	Blutdruck in Millim. Hg	Recorderpulse: Maximale Pulse, Millimeter	Recorderpulse: Mittelzahl v. 10 (20) Pulshöhen Millimeter	Recorderpulse: Mittlere Pulsgrösse × Pulsfrequenz	Recorderpulse: Abstand der „diastol. Linie" v. der Abscisse	Bemerkungen
a	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*	*g*	*h*	*i*
1.	0	198	86	26·6	12·54	2482·9	20	Die Grösse d. Recorderpulse wechselt period. Taf. VIII Fig. 1 *a*. (Obs. 1–2)
2.	2′	192	82	34·5	11·73	2252·2	16	
3.	3′ 40″	195	80	31·1	13·76	2683·2	16	Physiol. Kochsalzlös., 1 ccm; Injectionsdauer 30″.
4.	4 30	192	88	28·1	11·83	2265·6	15·5	
5.	6	192	83	27·0	14·38	2764·8	15·0	Taf. VIII Fig. 1 *b*.
6.	7 20	192	82	—	—	—	—	Physiol. Kochsalzlös., 5 ccm; Injectionsdauer 40″.
7.	10 10	189	84	46·2	21·94	4139·1	ca. 26	Kurz nachher Drucksenkung (Krampf?).
8.	12	185	67	32·0	21·71	4016·4	ca. 27	
9.	13	183	68	41·1	22·35	4080·9	ca. 26	Taf. VIII Fig. 1 *c*.
10.	13 28	—	—	—	—	—	—	Physiol. Kochsalzlös., 10 ccm; Injectionsdauer 65″.
11.	14	174	58	25·0	13·64	2373·4	ca. 34	Das Herz schwillt stark an; die Recorderpulse nehmen rasch ab.
12.	17	156	46	18·0	12·73	1985·9	ca. 27	Taf. VIII Fig. 1 *d*.
13.	17 25	—	—	—	—	—	—	Coffeïn, 1 ccm; Injectionsdauer 25″.
14.	18	162	38	11·0	8·45	1368·9	ca. 27	Taf. VIII Fig. 1 *e*. Kurz nachher eine Drucksteigerung.
15.	19	150	46	11·0	—	—	—	
16.	23	132	37	11·3	8·9	1174·8	ca. 23	Taf. VIII Fig. 1 *f*. Coffeïn, 3 ccm; Injectionsdauer 20″. Der Druck sinkt anfangs noch mehr ab; die Recorderpulse, zuerst kleiner, wachsen nachher allmählich.
17.	25	141	42	11·0	—	—	ca. 20	
18.	28	135	48	15·0	11·72	1579·5	ca. 26	Taf. VIII Fig. 1 *g*.
19.	28 20	—	—	—	—	—	—	Coffeïn, ca. 4 ccm; Injectionsdauer 37″. Anfangs Druckerniedrigung und unregelmässige, zum Theil grosse Recorderpulse (25 mm). Dann — siehe Obs. 20.
20.	30	159	56	14·7	11·05	1757·0	ca. 25	
21.	33	145	55	14·8	11·6	1682·0	ca. 26	
22.	33 20	—	—	—	—	—	—	Coffeïn, 10 ccm; Injectionsdauer 53″. — Starke Drucksenkung; während $1^1/_2$ Minute sehr unregelmässige, zum Theil grosse Recorderpulse — s. Obs. 23.

Nr. der Observat.	Zeit nach Anfang des Versuches in Minuten	Pulsfrequ. in 1 Min.	Blutdruck in Millim. Hg	Recordercurve: Maximale Pulse, Millimeter	Recordercurve: Mittelzahl v. 10 (20) Pulshöhen Millimeter	Recordercurve: Mittlere Pulsgrösse × Pulsfrequenz	Recordercurve: Abstand der diastol. Linie v. der Abscisse	Bemerkungen
a	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*	*g*	*h*	*i*
23.	34′	174	32	17 [40]	—	—	21 bis 15 [8]	Nachher fängt das Herz mit einem Mal an, regelmässig zu arbeiten; gleichzeitig steigt der Blutdruck rasch an.
24.	35 10″	192	78	15·0	11·28	2169·6	ca. 27	Taf. VIII Fig. 1*h*.
25.	40	160	71	17·6 [19·3]	13·6	2176·0	ca. 26	
26.	42	156	67	18·0	14·1	2199·6	ca. 26	Taf. VIII Fig. 1*i*.
27.	45	150	62	17·6	14·27	2140·5	ca. 25	Kurz nachher Digitalin, 1 ccm; Injectionsdauer 22″.
28.	48	138	58	15·0	—	—	—	Nachher wieder Digitalin, 3 ccm (in 12″). Drucksenkung.
29.	48 45	—	40	11·0	—	—	—	
30.	52	132	61	13·0	—	—	—	
31.	52 10	—	—	—	—	—	—	Digitalin, 10 ccm in 35″. Schnelle Abnahme der Pulszahl, Blutdruck und Recorderpulsationen bis zum Tode.
32.	52 30	123	51—40	10—5	—	—	—	Bald nur einzelne, sehr schwache Herzschläge. Der Recorder zeichnet dazwischen eine nahezu gerade Linie (Fig. 3 *B* S. 270).

Versuch II. 13. Februar 1901. Kaninchen, 1640 g schwer.

1.	0	123	47	4·3	2·64	316·8	16·7	Grösse der Recorderpulse wellenförmig wechselnd. Taf. VIII Fig. 2*a*.
2.	2′	120	44	4·3	—	—	—	Kürzere Wellen.
3.	3	135	48	5·4	2·53	341·6	15·8	Recorderpulse unregelmässig wechselnd. Taf. VIII Fig. 2*b*.
4.	3 12″	—	—	—	—	—	—	Coffeïn, 0·5 ccm. Dauer der Einspritzung 15″.
5.	4	150	61	6·0 [6·9]	—	—	—	
6.	5 30	177	81	10·0	3·92	588	13·1	Taf. VIII Fig. 2*c*.
7.	5 48	—	—	—	—	—	—	Coffeïn, 1 ccm. Injectionsdauer 56″.
8.	7	222	90	12·0	—	—	—	
9.	8	210	93	14·0	—	—	—	
10.	9	210	93	15·0	6·33	1329·3	12·1	Taf. VIII Fig. 2*d*.
11.	9 22	—	—	—	—	—	—	Unterbrechung der künstlichen Athmung während 33″. Während dieser Zeit: (Obs. 12).

Versuch II. (Fortsetzung.)

Nr. der Observat.	Zeit nach Anfang des Versuches in Minuten	Pulsfrequ. in 1 Min.	Blutdruck in Millim. Hg	Recordercurve: Maximale Pulse, Millimeter	Recordercurve: Mittelzahl v. 10 (20) Pulshöhen Millimeter	Recordercurve: Mittlere Pulsgrösse × Pulsfrequenz	Recordercurve: Abstand der „diastol. Linie" v. der Abscisse	Bemerkungen
a	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*	*g*	*h*	*i*
12.	5′ 55″	141	168/132	10·0—2·0	—	—	—	Blutdruck stark wechselnd. Die Recordercurve gleichmässig abnehmend; nachher Druckerniedrigung (Obs. 13).
13.	—	—	94	—	—	—	—	
14.	10 30	222	112	9·5	7·79	1729·4	15·5	Recorderpulse gut entwickelt, regelmässig alternirend. Taf. VIII Fig. 2 *e*.
15.	11 7	—	—	—	—	—	—	Coffeïn, 1 ccm. Injectionsdauer 37″.
16.	12	222	112	8·0	6·32	1403·0	15·5	Typus der Recorderpulse wie bei Obs 14..
17.	17	207	100	9·0	6·92	1432·4	14·6	
18.	17 37	—	—	—	—	—	—	Coffeïn, 2 ccm. Injectionsdauer 24″. Druckfall (Obs. 19).
19.	17 55	195	64	6·0	4·68	912·6	15·4	Nachher wieder schnelle Drucksteigerung.
20.	18 40	204	98	9·0	5·62	1150·6	14·4	
21.	21	198	96	9·0	—	—	—	
22.	21 19	—	—	—	—	—	—	Erstickung während 10″. Effect (Obs. 23).
23.	21 27	111	122/78	11·0—3·0	—	—	—	Recorderpulse regelmässig, schnell abfallend.
24.	21 38	—	72	5·0	—	—	—	Dann Drucksteigerung.
25.	22	186	93	7·0	—	—	—	
26.	23	192	94	7·0	5·09	977·3	12·2	
27.	23 10	—	—	—	—	—	—	Coffeïn, 1 ccm. Injectionsdauer 54″.
28.	24 30	198	96	9·5	5·53	1094·9	12·1	
29.	26	192	94	10·0	—	—	—	
30.	27	190	92	10·0	6·14	1166·6	9·1	Taf. VIII Fig. 2 *f*.
31.	27 27	—	—	—	—	—	—	Coffeïn, 5 ccm. Injectionsdauer 75″.
32.	27 40	183	57	8·0	—	—	—	Druckerniedrigung während d. Injection (Taf. VIII Fig. 2 *g*); dann schnelle Steiger. (Obs. 34—37).
33.	28 40	201	54	7·0	4·0	804·0	9·5	
34.	29 30	204	96	9·4	—	—	—	
35.	30 30	180	95	9·0	—	—	—	
36.	39 30	180	87	12·3	—	—	—	

Versuch II. (Fortsetzung.)

Nr. der Observat.	Zeit nach Anfang des Versuches in Minuten	Pulsfrequ. in 1 Min.	Blutdruck in Millim. Hg	Recorderpulse: Maximale Pulse, Millimeter	Recorderpulse: Mittelzahl v. 10 (20) Pulshöhen Millimeter	Recorderpulse: Mittlere Pulsgrösse × Pulsfrequenz	Recorderpulse: Abstand der „diastol. Linie“ v. der Abscisse	Bemerkungen
a	b	c	d	e	f	g	h	i
37.	40′ 30″	180	87	13·0	8·26	1506·8	13·8	Taf. VIII Fig. 2*h*.
38.	41	—	—	—	—	—	—	Strophantin (1 pro mille), 2 ccm. Injectionsdauer 54″.
39.	42	150	82	10·0	—	—	—	
40.	43	204	94	7·3	—	—	—	Kurz nachher schnelle Drucksenk.
41.	44	180	32	3·0[6·2]	—	—	—	
42.	44 30	0	nahe 0	—	—	—	—	Herzstillstand. Taf. VIII Fig. 2*i*.

An Fig. 2*i* Taf. VIII sieht man, dass der Recorder zuletzt eine beinahe gerade Linie zeichnet, die eine ganz geringe Anschwellung des Herzens andeutet. Die fortgehende künstliche Athmung macht sich auf dieser Linie nicht bemerkar.

Versuch III. 15. Februar 1901. Kaninchen, 1640 g schwer.

Nr. der Observat.	Zeit nach Anfang des Versuches in Minuten	Pulsfrequ. in Min.	Blutdruck in Millim. Hg	Recorderpulse: Maximale Pulse, Millimeter	Recorderpulse: Mittelzahl v. 10 (20) Pulshöhen Millimeter	Recorderpulse: Mittlere Pulsgrösse × Pulsfrequenz	Recorderpulse: Abstand der „diastol. Linie“ v. der Abscisse	Bemerkungen
a	b	c	d	e	f	g	h	i
1.	0	123	28	9·5	5·88	723·2	11·4	
2.	1′ 30″	123	29	13	7·29	896·7	11·3	Recorderpulse wellenförmig wechselnd. Taf. VIII Fig. 3*a*.
3.	1 53	—	—	—	—	—	—	Coffeïn, 0·5 ccm. Injectionsdauer 22″.
4.	4	152	36	15·5	8·58	1304·2	11·0	Schnell wechselnde Wellen der Recorderpulse.
5.	5	180	max. 90	12—7	—	—	—	Kurz dauernde Erstickung (Aufhören d. künstl. Athmung). Regelmässig abnehmende Recorderpulse. Siehe Fig. 1 (S. 268.)
6.	6	188	48	16	—	—	—	
7.	7	195	53	18·5	9·34	1821·3	10·0	Grosse Wellen.

Versuch III. (Fortsetzung.)

Nr. der Observat.	Zeit nach Anfang des Versuches in Minuten	Pulsfrequ. in 1 Min.	Blutdruck in Millim. Hg	Recorderpulse: Maximale Pulse, Millimeter	Recorderpulse: Mittelzahl v. 10 (20) Pulshöhen Millimeter	Recorderpulse: Mittlere Pulsgrösse × Pulsfrequenz	Recorderpulse: Abstand der „diastol. Linie" v. d. Abscisse	Bemerkungen
a	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*	*g*	*h*	*i*
8.	7′ 19″	—	—	—	—	—	—	Coffeïn, 1 ccm. Injectionsdauer 35″.
9.	8 30	210	60	20	9·46	1986·6	9·5	Taf. VIII Fig. 3*b*.
10.	9 7	216	max. 92	11	—	—	—	Erstickung, 6″. Regelmässige, gleichgrosse Recorderpulse.
11.	10	216	66	20	9·4	2030·4	10·8	
12.	11 30	222	75	20	9·01	2000·2	11·0	
13.	12 8	—	—	—	—	—	—	Coffeïn, 2 ccm. Injectionsdauer 28″.
14.	12 30	—	46	16	—	—	—	Am Ende der Injection Blutdruckerniedrigung und kleinere Recorderpulse.
15.	13 30	231	88	17·5	8·08	1866·5	11·5	
16.	13 51	225	118	9—8	8·5	1912·5	10·0	Kurzdauernde Erstickung.
17.	14 20	243	87	17	8·36	2031·5	10·9	
18.	19 50	234	92	19	7·85	1836·9	10·1	
19.	19 57	—	—	—	—	—	—	Coffeïn, 1 ccm. Injectionsdauer 26″. Geringe Druckerniedrigung (78 mm), dann langsame Steigerung.
20.	21 50	240	100	16·7	6·59	1580	9·6	
21.	25 20	243	102	21	6·20	1506·6	8·4	Taf. VIII Fig. 3*c*.
22.	25 30	—	—	—	—	—	—	Coffeïn, 5 ccm. Injectionsdauer 50″. Druckabnahme (bis 64 mm), dann Steigerung. Kurz nach der Injection Krampf. Starke Abnahme der Recorderpulse (bis 4·5 mm). Taf. VIII Fig. 3*d*.
23.	26 30	246	147/116	36 [46]	—	—	—	Druck sehr wechselnd, Recorderpulse ebenso.
24.	27	252	155/132	38·5	—	—	—	
25.	27 12	228	152/138	Min. bis 46	—	—	—	Erstickung (27′ 12″ bis 27′ 47″).
26.	27 50	252	128/114	50 [65]	21·39	5392·8	5·6	Taf. VIII Fig. 3*e*.
27.	29 50	246	116	30	13·0	3198	10·0	Taf. IX Fig. 3*f*. Kurz nachher Krampf.
28.	30 11	—	149	16, spät. 42	—	—	—	Druck schnell wechselnd.
29.	31	246	118	37	11·52	2833·9	8·8	Nachher wiederholte Krämpfe mit wechselndem Druck; dann eine Periode d. Erstickung.

Versuch III. (Fortsetzung.)

Nr. der Observat.	Zeit nach Anfang des Versuches in Minuten	Pulsfrequ. in 1 Min.	Blutdruck in Millim. Hg	Recorderpulse: Maximale Pulse, Millimeter	Recorderpulse: Mittelzahl v. 10 (20) Pulshöhen Millimeter	Recorderpulse: Mittlere Pulsgrösse × Pulsfrequenz	Abstand der „diastol. Linie" v. d. Abscisse	Bemerkungen
a	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*	*g*	*h*	*i*
30.	37′	243	108	25 [47]	12·26	2979·2	3·2	
31.	37 39″	—	—	—	—	—	—	Coffeïn, 10 ccm. Injectionsdauer 87″. Druck nachher 74 mm. Kleine Recorderpulse.
32.	39 45	245	130/114	45	15·4	3863·0	1·2	Taf. IX Fig. 3 *g*.
33.	43	243	106	46 [63]	—	—	—	
34.	43 20	—	—	—	—	—	—	Künstl. Athmung unterbrochen. Fig. 2* [S. 268]. Spontane Athmung bis Obs. 41.
35.	44	231	117	54	47·88	11064·9	5·5	Regelmässige schöne Recorderpulse; spont. Athm. Fig. 2 *b*.
36.	45	234	114	62	53·61	11944·7	9·5	Nachher plötzliche Abnahme der Recorderpulse, gleichzeitig mit Drucksteigerung, 136 mm.
37.	45 40	228	120	37	34·6	7888·8	9·1	Dann wieder plötzliche Zunahme der Recorderpulse.
38.	47	222	117	47	28·0	6621·6	3·5	Fig. 2 *c*.
39.	47 30	—	—	19	—	—	—	Blutdruck nicht mehr registrirt (Coagulat.). Recorderpulse nehmen plötzlich ab, wachsen dann wieder rasch an.
40.	51	—	—	57	31·7	—	13·2	Regelm., grosse Recorderpulse.
41.	52 28	—	—	60	—	—	—	Einleitung der künstl. Athmung. Recorderpulse nehmen ab.
42.	54 30	—	—	31	—	—	—	
43.	54 50	—	—	—	—	—	—	Cyankalium (0·5 Proc.) 1 ccm.
44.	55 10	—	—	65	—	—	—	Einige grosse Pulse; dann sehr schnelle Abnahme; unregelmäss. Herzaction.
45.	55 42	—	—	2½	—	—	—	Ende der Injection.

Das Herz schwillt enorm an, macht kleine, langsame, unregelmässige Bewegungen, wird weder von 1 ccm Coffeïn, noch von Erstickung beeinflusst. Ende des Versuches 62′ nach dem Anfang desselben.

Versuch IV. 18. Februar 1901. Leporid, 2420 g. Der Recorder zeichnete Anfangs nur kleine Pulse, denjenigen einer Blutdruckcurve sehr ähnlich (Taf. IX Fig. 4 *a*); 0·5 und später 1 ccm Coffeïn steigerten den

Druck von 43 bis 70 mm Hg, die Pulsfrequenz variirte zwischen 222, 210, 216 bis 228 Schlägen in 1 Minute, die einzelnen kleinen Pulsationen des Recorders wurden nach den Coffeïninjectionen grösser; die maximalen Pulse nahmen von 2 und 1·6 mm bis zu 3·5[4] mm zu. (Taf. IX Fig. 4 *b*.) Die „diastolische Linie" war um 18·5 bezw. 19·5 mm von der Abscisse entfernt. Im Mittel betrugen die einzelnen Pulse vor der Injection 0·82 mm, nach derselben 2·2 mm; das Product von mittlerer Pulsgrösse und Pulsfrequenz — die „Minuten-Pulsgrösse" — stieg dabei von 182·0 zu 460·6. — 10 Minuten nach dem Anfang des Versuches wurde die künstliche Athmung während 20″ unterbrochen, wobei der Typus der Recorderpulse sich schnell änderte und ihr Umfang bedeutend zunahm. Der weitere Verlauf geht aus folgender Tabelle hervor.

Nr. der Observat.	Zeit nach Anfang des Versuches in Minuten	Pulsfrequ. in 1 Min.	Blutdruck in Millim. Hg	Recorderpulse: Maximale Pulse, Millimeter	Recorderpulse: Mittelzahl v. 10 (20) Pulshöhen Millimeter	Recorderpulse: Mittlere Pulsgrösse × Pulsfrequenz	Recorderpulse: Abstand der „diastol. Linie" v. d. Abscisse	Bemerkungen
a	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*	*g*	*h*	*i*
1.	11′	162	96	23	—	—	—	Effect der Erstickung.
2.	12	240	91	24	13·14	3144	19·2	Taf. IX Fig. 4 *c*. Pulszahl und Druck nehmen allmählich zu.
3.	20 20″	264	98	31	11·52	3041·3	20·1	
4.	20 50	—	—	—	—	—	—	Coffeïn, Gabe unbestimmt, ein Theil der Lös. ging verloren.
5.	21 30	252	68	21	14·0	3528	20·3	Taf. IX Fig. 4 *d*.
6.	25	265	100	24	10·4	2736	15·8	
7.	26 12	—	—	—	—	—	—	Coffeïn, 3 ccm; Injectionsdauer 23″.
8.	27 20	276	104	26	10·97	3027·7	19·2	
9.	28	276	104	26	13·12	3615·6	19·1	
10.	28 52	—	—	—	—	—	—	Aufhören der künstl. Athm. währ. nahe 6 Min.; das Thier athmet spontan, Fig. 4 *e*. Injection von 5 ccm Coffeïn steigerte zufällig die Pulszahl, brachte den Druck etwas herunter, hatte auf die Recorderpulse keinen deutl. Einfluss. Herzarbeit zuletzt immer schlechter. (Erstickung.)
11.	29	183	109	25	20·25	3702·9	17·5	
12.	34 40	267	105	27	—	—	—	Künstliche Athmung.
13.	39 40	258	105	24	9·48	2445·8	20·1	
14.	40 7	—	—	—	—	—	—	Coffeïn, 5 ccm; Injectionsd. 31″
15.	40 30	261	92 (Min. 83)	22	—	—	—	

Nr. der Observat.	Zeit nach Anfang des Versuches in Minuten	Pulsfrequ. in 1 Min.	Blutdruck in Millim. Hg	Recorderpulse: Maximale Pulse, Millimeter	Recorderpulse: Mittelzahl v. 10 (20) Pulshöhen Millimeter	Recorderpulse: Mittlere Pulsgrösse × Pulsfrequenz	Recorderpulse: Abstand der „diastol. Linie“ v. der Abscisse	Bemerkungen
a	b	c	d	e	f	g	h	i
16.	41′	267	104	24	11·04	2947·7	21·6	
17.	42	258	106	23	—	—	—	
18.	45	264	104	22	10·82	2856·5	18·5	
19.	45 3″	—	—	—	—	—	—	Coffeïn, 10 ccm. Injectionsd. 37″.
20.	45 40	270	86 (Min. 74)	20	—	—	—	
21.	46 30	270	109	21	10·6	2862·0	22·5	
22.	49	258	104	22	10·24	2644·0	20·4	
23.	50 7	—	—	—	—	—	—	Erstickung während 41″.
24.	50 10	132	117	—	—	—	—	Während der Erstickung.
25.	51 30	258	103	26 [32·8]	—	—	—	
26.	56 30	252	102	26	9·6	2283·1	18·3	
27.	57 6	—	—	—	—	—	—	Cyankalium (0·5 Proc.), 0·5 ccm; Injectionsdauer 30″.
28.	57 50	108	137 (155/118)	20 [29]	—	—	—	Recorderpulse unregelm., immer kleiner. Das Herz schwillt stark an.
29.	59	—	—	—	—	—	—	Das Herz fängt wieder an, sich zu erholen.
30.	59 40	138	133	—	—	—	—	Kleine Recorderpulse.
31.	61 20	165	124	20	—	—	—	
32.	63 10	198	134	22	—	—	—	
33.	63 36	—	—	—	—	—	—	Cyankalium, 1 ccm.

Die Recordercurve zeigt eine bedeutende Anschwellung des Herzens; bald treten nur einzelne deutliche Pulse hervor (Fig. 3 *A* S. 270). Unterbrechung und Wiederbeginn der künstlichen Athmung haben auf den Verlauf der Recordercurve nur einen ganz unbedeutenden Einfluss.

Versuch V. 20. Februar 1901. Kaninchen. 1960 g. Bedeutende Blutung beim Oeffnen des Brustkastens. Pulszahl und Blutdruck sind daher anfangs niedrig (Puls 132, 114, 120, 132, Druck 35, 26, 30 mm) und die Recorderpulse klein (im Mittel 1·46, 1·78, 1·67 mm. Taf. IX Fig. 5 *a*). Entfernung der „diastolischen Linie“ von der Abscisse 18·3 bis 19·8 mm. Zwei kleine Coffeïninjectionen (0·5 und 1·0 ccm) haben kaum einen bemerkbaren Einfluss. Eine kurzdauernde Erstickung 9 Minuten nach dem Anfang des Versuches erweckt gleichsam die Empfindlichkeit der Organe (Druck momentan 82 mm) und dann hebt sich allmählich die Circu-

lation, so dass sie zuletzt unter dem Einflusse der Coffeïneinspritzungen sich ziemlich normal gestaltet, wie aus folgender Tabelle hervorgeht.

Nr. der Observat.	Zeit nach Anfang des Versuches in Minuten	Pulsfrequ. in 1 Min.	Blutdruck in Millim. Hg	Recorderpulse: Maximale Pulse, Millimeter	Recorderpulse: Mittelzahl v. 10 (20) Pulshöhen Millimeter	Recorderpulse: Mittlere Pulsgrösse × Pulsfrequenz	Recorderpulse: Abstand der „diastol. Linie" v. der Abscisse	Bemerkungen
a	b	c	d	e	f	g	h	i
1.	10′ 40″	162	50	4·1	3·33	539·5	22·3	Taf. IX Fig. 5*b*.
2.	12 20	162	51	4·1	3·02	489·2	23·0	
3.	12 35	—	—	—	—	—	—	Coffeïn, 2 ccm. Injectionsd. 12″.
4.	13	162	57	4·9	2·89	468·2	23·5	
5.	15 30	162	61	4·1	3·35	542·7	23·5	
6.	16 5	—	—	—	—	—	—	Coffeïn, 3 ccm. Injectionsdauer 31″.
7.	17 30	186	71	5·0	3·75	697·5	24·8	
8.	21	174	73	6·0	4·13	713·4	26·0	
9.	21 32	—	—	—	—	—	—	Coffeïn, 5 ccm. Injectionsd. 23″; sofort Druckerniedrigung.
10.	23 10	180	78	6·5	4·56	830·8	26·5	
11.	24	186	78	7·0	—	—	—	
12.	26	180	76	7·5	—	—	—	Taf. IX Fig. 5*c*.
13.	31 20	180	76	7·0	5·14	925·2	24·0	
14.	32 7	—	—	—	—	—	—	Coffeïn, 10 ccm. Injectionsd. 53″. Druckerniedr. (vgl. Obs. 15).
15.	32 50	210	62	5·1	—	—	—	
16.	35·30	180	89	7·0	5·12	921·6	23	
17.	37	180	86	6·8	5·35	963·0	22·5	
18.	39	—	—	—	—	—	—	Krämpfe; Recorderpulse momentan niedriger.
19.	40	186	86	7·6	5·0	930·0	18·5	
20.	41	90	Max. 127	13 [30]	—	—	—	Erstickung, 30″. Pulszahl, Druck u. Recorderausschl. wechselnd.
21.	42	186	82	8·4	6·61	1229·5	19·0	Taf. IX Fig. 5*d*.
22.	43	180	85	7·7	5·76	1036·8	18·0	
23.	43 27	—	—	—	—	—	—	Coffeïn, 10 ccm. Injectionsdauer 48″.
24.	44	228	58	5·0	—	—	—	Während der Injection.
25.	45	192	91	4·6	4·01	769·9	20·0	Kurz nachher Krämpfe u. Drucksteigerung, 131 mm. Recorderpulse dabei vorübergehend minimale.

Versuch V. (Fortsetzung.)

Nr. der Observat.	Zeit nach Anfang des Versuches in Minuten	Pulsfrequ. in 1 Min.	Blutdruck in Millim. Hg	Recorderpulse: Maximale Pulse, Millimeter	Recorderpulse: Mittelzahl v. 10 (20) Pulshöhen Millimeter	Recorderpulse: Mittlere Pulsgrösse × Pulsfrequenz	Recorderpulse: Abstand der „diastol. Linie" v. d. Abscisse	Bemerkungen
a	b	c	d	e	f	g	h	i
26.	46′ 50″	162	96	5·7	4·82	780·8	19·0	
27.	50	174	92	6·3	5·11	889·1	15·5	
28.	54 40	180	89	5·5	2·94	529·2	17·5	
29.	54 49	—	—	—	—	—	—	Strophantin (1 pro mill.), 0·5 ccm. Injectionsdauer 16″.
30.	55 28	—	Max. 124	—	—	—	—	Krämpfe. Recorderpulse etwas kleiner.
31.	56 50	204	95	5·0	—	—	—	
32.	58 50	216	89	6·0	—	—	—	
33.	59 17	—	—	—	—	—	—	Strophantin, 1 ccm. Injectionsdauer 23″.
34.	59·40	216	88—70	5[17]	—	—	—	Sehr unregelmässig.

Dann folgen Krämpfe, der Puls ist nicht mehr zählbar, der Druck sinkt rasch. Herzstillstand. Die künstliche Athmung macht nachher an der Recordercurve kleine Wellen (0·5 bis 1·5 mm), die beim Aufhören der Einblasungen verschwinden. Hebung, Biegung und sonstige Bewegungen der Pericardialcanüle ändern die Sache nicht.

Versuch VI. 29. Mai 1901. Kaninchen, 1310 g. Beide Vagi frei präparirt und mit Fäden umschlungen. Am Ende des Versuches wurde eine halbprocentige Lösung von Helleboreïn eingespritzt.

Nr. der Observat.	Zeit nach Anfang des Versuches in Minuten	Pulsfrequ. in 1 Min.	Blutdruck in Millim. Hg	Recorderpulse: Maximale Pulse Millimeter	Recorderpulse: Mittelzahl v. 10 (20) Pulshöhen Millimeter	Recorderpulse: Mittlere Pulsgrösse × Pulsfrequenz	Recorderpulse: Abstand der „diastol. Linie" v. der Abscisse	Bemerkungen
a	b	c	d	e	f	g	h	i
1.	0	73	20	—	—	—	—	Taf. IX Fig. 6*a*.
2.	1′ 30″	87	18	13·7	6·57	571·6	22	
3.	1 50 bis 2′ 30″	—	—	—	—	—	—	Beide Vagi am Halse durchschn.; keine unmittelbar eintretende Veränderung.
4.	3	108	19	12·3	5·97	644·8	25	

Versuch VI. (Fortsetzung.)

Nr. der Observat.	Zeit nach Anfang des Versuches in Minuten	Pulsfrequ. in 1 Min.	Blutdruck in Millim. Hg	Recorderpulse: Maximale Pulse, Millimeter	Recorderpulse: Mittelzahl v. 10 (20) Pulshöhen Millimeter	Recorderpulse: Mittlere Pulsgrösse × Pulsfrequenz	Recorderpulse: Abstand der „diastol. Linie“ v. der Abscisse	Bemerkungen
a	b	c	d	e	f	g	h	i
5.	3′ 45″	—	—	—	—	—	—	Coffeïn, 0·5 ccm. Injectionsd. 22″.
6.	4	135	26	—	—	—	—	Recorderp. momentan sehr klein und unregelmässig.
7.	5	153	36	18·0	9·35	1430·5	20	Die Recorderp. wachsen rasch.
8.	7	165	42	22·0	11·89	1963·5	21	Taf. IX Fig. 6*b*.
9.	7 4	—	—	—	—	—	—	Coffeïn, 1 ccm, während 28″ injicirt.
10.	8	180	54	22·5	11·66	2098·8	22	Regelmässig, wellenförmig wechselnde Recorderpulse.
11.	10	177	62	22·9	11·56	2046·1	23	
12.	12	177	65	22·1	12·75	2256·8	23	Taf. IX Fig. 6*c*.
13.	12 15	—	—	—	—	—	—	Coffeïn, 2 ccm, währ. 20″ eingespr.
14.	12 30	183	57	—	—	—	—	Druckerniedrigung.
15.	13	189	70	20·1	10·25	1937·3	24	
16.	14	186	77	21·4	10·51	1954·9	24	
17.	17 30	192	80	20·6	9·17	1760·6	24	
18.	17 42	—	—	—	—	—	—	Coffeïn, 5 ccm, während 48″ injic.
19.	18	189	64	7—10	—	—	—	Druckerniedrigung; kleinere Recorderpulse.
20.	19	187	82	20·8	9·51	1778·4	24	
21.	21	195	88	18·0	—	—	—	
22.	22	192	90	18·0	8·85	1699·2	25	
23.	22 39	—	—	—	—	—	—	Coffeïn, 10 ccm. Injectionsd. 73″.
24.	23 30	222	56	10·0	—	—	24	
25.	25	204	104	13·8	6·75	1377·0	24	
26.	26 50	204	111	11·1	—	—	23	
27.	28	198	108	12·0	7·25	1435·5	24	
28.	29	—	—	—	—	—	—	Helleboreïn, 3 ccm, während 22″ eingespritzt.
29.	29 35	240	160	12·3	6·44	1543·6	18	
30.	30 30	192?	104	19·0	—	—	5	
31.	31	—	60	11·1	—	—	0—1	Die Herzthätigkeit und der Blutdruck sinken rasch zum Minimum. Das Herz zieht sich stark zusammen. Der Recorder schreibt zuletzt kleine „respiratorische“ Wellen, die bei Unterbrechung der künstlichen Athmung aufhören (Fig. 3 *C* S. 270).

Was lehren nun die hier mitgetheilten Versuche?

Im Anfange des Versuches I wurde einige Male physiologische Kochsalzlösung eingespritzt. Durch einen nicht näher zu erklärenden Zufall — oder durch den Einfluss der Zeit an sich — wird dabei, von einer zufälligen Steigerung der Pulsvolumina (Observat. 7 bis 9, Col. *e* und *f*) abgesehen, die vorher recht gute Herzthätigkeit abgeschwächt, was ja nicht als Folge der verhältnissmässig kleinen Kochsalzinjectionen aufgefasst werden kann, da bekanntlich viel grössere Eingiessungen solcher Lösung die Pulsfrequenz und den Blutdruck kaum beeinflussen (Dastre und Loye,[1] Johansson und Tigerstedt).[2] Bei schweren anämischen Zuständen (nach grossen Blutverlusten), sowie auch bis zu gewissem Grade bei Gefässparalysen und bei Herzschwäche anderer Art können ja bekanntlich Kochsalzinfusionen wenigstens momentan den Kreislauf heben — zuweilen sogar lebenserretend wirken. Ich führe hier den Anfang des Versuches I nur darum an, weil derselbe in einem gewissen Gegensatze zu dem folgenden Theile des Versuches steht, der nicht ganz ohne Interesse ist.

Eine ganz andere Wirkung haben nämlich nachher dieselben Flüssigkeitsmengen, mit dem Coffeïnpräparate darin gelöst: sofort gehen Pulsfrequenz und Blutdruck bedeutend in die Höhe, und nachdem diese sich wieder etwas gemässigt haben, nehmen auch die „Pulsvolumina" nicht unbeträchtlich zu. Diese Parallele ist recht lehrreich. Wenn auch die Coffeïninjectionen, da sie in anderen Versuchen einem schlecht arbeitenden Circulationsapparate beigebracht wurden und die Functionen desselben erhoben, nicht nur durch das Coffeïn, sondern wahrscheinlich auch durch die Flüssigkeit an sich vortheilhaft wirkten, ist es doch wohl ausser Zweifel, dass der Effect zum Theil — vielleicht zum grossen Theil — durch das Coffeïn selbst bedingt wurde. Vor Allem ist es wohl sicher, dass das Coffeïn in nicht zu grossen Gaben einer solchen Hebung der Circulation nicht entgegen wirkt, eher dieselbe begünstigt. In welcher Art das Coffeïn dabei wirkt, werde ich später zu beleuchten versuchen.

Um eine Uebersicht der Resultate meiner Versuche zu erleichtern, folgt auf nächster Seite eine tabellarische Zusammenstellung von den höchsten Werthen vor und nach der Vergiftung, welche die Pulsfrequenz, der Blutdruck, die (mittleren) Recorderpulse und die „Minutenpulsgrössen" aufwiesen, wozu noch Angaben über die verabreichten Giftdosen und über das Verhalten der „diastolischen Linie" beigefügt werden.

[1] Dastre und Loye, *Archiv. de physiol.* 1888. Bd. II. S. 93 bis 114.

[2] Johansson und Tigerstedt, *dies. Archiv.* 1889. Bd. I. S. 352 u. flg.

Uebersicht der Versuchsergebnisse.

Versuchs-Nr.	Giftgaben in Centigramm des Coffeïnpräparates*	Pulsfrequenz		Blutdruck		Recorderpulse (Mittelwerthe)		„Minuten-Pulsgrösse“		Abstand der „diast. Linie“ v. d. Abscisse	
		vor	nach**	vor	nach	vor	nach	vor	nach	vor	nach†
I.††	0·5, 1·5, 2, 5 = 9·0	156	192	46	78	12·73	14·27	1985·9	2199·6	27	26
II.	0·25, 0·5, 0·5, 1, 0·5, 2·5 = 5·25	135	222	48	112	2·64	8·26	341·6	1506·8 [1729·4]	16·7	13·3
III.	0·25, 0·5, 1, 0·5, 2·5, 5 = 9·75	123	252	29	120	7·29	15·4 [53·6]	896·7	3863·0 [11944·7]	11·3	1·2 [spät 13·2]
IV.	0·25, 0·5, ?, 1·5, 2·5, 2·5, 5 = >12·25	222	276	43	109	ca. 1·0	14·0 [20·25]	182·0	3615·6	18·5	20·3
V.	0·25, 0·5, 1, 1·5, 2·5, 5, 5 = 15·75	132	228	35	96	1·78	6·61	235	1229·5	19·8	19·0
VI.	0·25, 0·5, 1, 2·5, 5 = 9·25	108	222	20	111	6·57	12·75	644·8	2256·8	22	23

* Die Gaben von Coffeïn machen etwa die Hälfte der hier angeführten Werthe aus.

** Nämlich vor und nach der Einwirkung der Coffeïninjectionen. Im Versuch I sind einzelne Werthe kurz nach der ersten Coffeïneinspritzung beobachtet worden; offenbar war noch keine Wirkung des Coffeïns eingetreten.

† Diese Angaben beziehen sich auf dieselben Observationen wie die hier aufgeführten (mittleren) Recorderpulse.

†† In diesem Versuche wird der erste Theil (mit den Kochsalzinjectionen) nicht berücksichtigt.

Diese höchsten Werthe sind nicht immer gleichzeitig für Pulsfrequenz, Blutdruck und Recorderausschläge beobachtet worden; die Zahlen sind jedoch in den Versuchsprotokollen leicht zu finden. Noch höhere Werthe, die unter dem unmittelbaren Einflusse einer Erstickung oder dgl. hervortraten, sind hier nicht aufgenommen.

Beim ersten Blick auf diese Uebersicht sehen wir, dass nach den Coffeïninjectionen Pulsfrequenz, Blutdruck und Recorderpulse mit den „Minuten-Pulsgrössen“ mehr oder weniger gesteigert worden waren; der Abstand der „diastolischen Linie“ von der Abscisse ist dagegen wenig verändert und kommt kaum in Betracht; nur in Versuch III hatte das Herz gleichzeitig mit dem Ausführen der 15·4 mm grossen (mittleren) Recorderpulse sich ziemlich stark zusammengezogen, d. h. die allgemeine Füllung der intrapericardialen Organe war eine geringere. Wie eben aus einander gesetzt wurde, kann diese bedeutende Verbesserung der Functionen der Kreislaufsorgane nicht gut auf den Infusionen von indifferenter Flüssigkeit allein beruhen, wenn auch dieselben bei dem anfangs schlechten Zustand dieser Organe nicht ohne einen günstigen Einfluss gewesen sind.

Die Steigerung der Pulsfrequenz zuerst ist ja unbestritten eine Wirkung des Coffeïns; sie tritt auch nach Durchschneidung der beiden Vagi stark hervor (Versuch VI). Ob diese Wirkung eine „nervöse“ oder eine rein „musculäre“ ist, darüber kann ich mich nicht bestimmt äussern; das hier vorliegende Material giebt dabei keine Leitung und auch dazu keinen Anlass. Die Entscheidung dieser Frage hängt mit der physiologischen Streitfrage zusammen, ob die Bewegungsimpulse des Herzens in rein musculären oder in nervösen Gebilden entstehen und inwieweit Veränderungen der Irritabilität des Herzmuskels die Frequenz seiner Contractionen beeinflussen kann. Mag es auch erwiesen sein, dass nach Reizung irgend welcher Art Bewegungsimpulse aus „musculären“ (oder „embryonalen“) Gebilden ohne Vermittlung von Ganglien ausgehen können, und dass ganglienfreie Herzmuskelstreifen bei Reizung einer rhythmischen Thätigkeit fähig sind, so ist damit kein entscheidender Beweis dafür geliefert, dass auch normal, bei der gewöhnlichen Herzarbeit, die in den meisten Herzen reichlich vorkommenden Ganglien auf die Zahl der Bewegungsimpulse ohne Einfluss sind, dass sie nicht im Gegentheil meistens die Pulsfrequenz bestimmen.

Die Erhöhung des Blutdruckes hing wohl sicher in meinen Versuchen wie in denjenigen anderer Untersucher, zum Theil wenigstens, von einer durch das Coffeïn bedingten Gefässcontraction ab, und da der Druck anfangs meistens ein abnorm niedriger war, so trat die

steigernde Wirkung recht scharf hervor. Hier stellt sich aber die Frage auf: wie verhielt sich das Herz? Trug es auch zu der Drucksteigerung bei? Unzweifelhaft, da die Recorderpulse mehr oder weniger stark zunahmen, während die „diastolische Linie“ nur wenig verändert wurde. Dass die Recorderpulse grösser wurden, hing natürlich in erster Linie damit zusammen, dass, da die Gefässe sich contrahirten, mehr Blut zum Herzen zurückströmte; das Herz wurde bei den Diastolen besser gefüllt. Es trieb aber auch viel mehr Blut in die Aorta heraus, denn sonst wäre nur die Recordercurve von der Abscisse emporgehoben, ohne dass die Recorderausschläge grösser geworden.

Es waren aber nicht nur die Pulsvolumina vergrössert. Das Herz trieb auch diese grösseren Blutmengen gegen einen bedeutend erhöhten Widerstand heraus, und gleichzeitig war die Pulsfrequenz gesteigert. Die Anforderungen an das Herz und die Leistung desselben waren also in sehr hohem Grade gesteigert. Die sog. „Minuten-Pulsgrössen“ weisen auch meistens eine bedeutende Steigerung auf, und darin ist jedoch nicht der Einfluss des höheren Widerstandes abgespiegelt.

Hier ist zu bemerken, dass jede Gefässcontraction, mag sie durch Coffeïn oder durch irgend ein anderes Reizmittel zu Stande gebracht worden sein, eine ähnliche Rückwirkung auf das Herz gehabt haben müsste, wenn nur nicht das Herz selbst abgeschwächt wurde. Die Steigerung des Widerstandes in dem Apparate liess in dem oben angeführten Versuche Bock's eine gewissermaassen ähnliche Wirkung hervortreten. Inwieweit in meinen Experimenten eine directe, günstige Herzwirkung mit im Spiele gewesen ist, oder Alles aus der Gefässwirkung (nebst der gesteigerten Pulsfrequenz) sich erklären lässt darüber lässt sich wohl, wie früher schon gesagt, nichts Bestimmtes, sondern nur Vermuthungen, die auf eine ziemlich willkürliche Schätzung gestützt sind, aussprechen. Zwar ist die Steigerung des Blutdruckes mit dem niedrigen Anfangsdrucke verglichen, recht gross — doch ist der erreichte Maximaldruck an sich nicht bedeutend, dagegen, von zufälligen Schwankungen abgesehen, lange anhaltend; oder der Druck steigt durch den ganzen Versuch allmählich an. Bei den Erstickungen (Unterbrechung der künstlichen Athmung) steigt aber der Druck meistens plötzlich bedeutend stärker in die Höhe, um bald wieder zu sinken. Es kann ja sein, dass die Steigerung des Gefässtonus durch das Coffeïn an sich eine mässigere, aber mehr anhaltende ist. Doch — wenn man die meistens recht bedeutende Vermehrung sowohl der Pulsvolumina (nach den Recorderausschlägen beurtheilt), als auch der Pulsfrequenz berücksichtigt und gleichzeitig die eben erwähnten Charaktere der Blutdrucksteigerung in der Erinnerung

festhält, liegt die Vermuthung sehr nahe, dass eine directe Herzwirkung des Giftes auch mit gewirkt hat.

So viel lässt sich aber wohl mit Sicherheit sagen, dass im Ganzen ein schwächender Einfluss des Coffeïns auf das Herz aus meinen Versuchen nicht nachzuweisen ist. Während oder unmittelbar nach der Einspritzung einer etwas grösseren Gabe kamen wohl oft eine Erniedrigung des Blutdruckes und ein Kleinerwerden der Recorderpulse, zuweilen eine vorübergehende Unordnung der Herzthätigkeit vor, während die Pulszahl fast sofort gesteigert wurde; doch dauerte es nicht lange, ehe auch der Druck und die von Neuem regelmässigen Recorderpulse wieder anstiegen. Während die Frequenz und der Druck noch hoch blieben, oder sich etwas gemässigt hatten, wuchsen nicht selten die Recorderausschläge weiter und erreichten dabei ihre höchsten Werthe. In den Versuchen I, II, III und V treten diese höchsten Werthe nach den grössten, zuletzt verabreichten Coffeïngaben (in Versuch V doch nach der ersten Zufuhr von 5 ^{cgr}) hervor; in Versuch IV und VI bringen die ersten Coffeïninjectionen die Recorderpulse am meisten in die Höhe; die folgenden, grösseren Gaben vermögen nicht dieselben weiter zu steigern, im Gegentheil nehmen sie deutlich ab. Vor Allem war dies in Versuch VI der Fall, wo die Vagi durchschnitten waren. Ob dieser Eingriff vielleicht die Anpassungsfähigkeit des Herzens herabgesetzt hat, lässt sich nicht bestimmt sagen, wohl aber vermuthen.

Ob das Coffeïn bei gleichbleibendem Widerstande gleichzeitig mit der Steigerung der Pulszahl die Volumina der einzelnen Pulse herabsetzt (Bock) oder unverändert lässt (Cushny), oder sogar vergrössert (Hedbom, nach Langendorff's Methode), das kann ich — wie anfangs schon hervorgehoben wurde — auf Grund meiner Versuche nicht entscheiden. Es scheint mir sehr wahrscheinlich, dass die Antwort verschieden ausfallen muss, je nachdem der (unveränderte) Widerstand von Anfang an ein geringer oder ein bedeutender ist, die initialen Pulsvolumina klein oder gross waren und je nachdem der Puls anfangs langsam oder schnell schlug und daher die durch das Coffeïn bedingte Beschleunigung desselben eine geringere oder eine grosse gewesen ist.

Was zuerst den Widerstand Seitens der Gefässe betrifft, ist eine mässige Höhe bezw. Erhöhung desselben am günstigsten. Ein zu niedriger Widerstand, d. h. zu schlaffe Gefässe, lassen das Blut in diesen stocken und zu wenig davon zum Herzen zurückkehren; ein zu hoher Widerstand andererseits hindert die Entleerung des Herzens. Weiter darf die Pulsfrequenz nicht zu stark erhöht werden, denn in

solchem Falle findet das Herz nicht Zeit, genügend grosse Pulse auszuführen. Zuletzt darf natürlich die Giftgabe nicht so gross sein, dass sie den Herzmuskel schädigt.

Aus meinen Versuchen scheint mir aber, wie mehrmals schon angedeutet, hervorzugehen, dass das Herz unter dem Einflusse des Coffeïns nicht nur schneller schlägt, sondern auch den bedeutend gesteigerten Anforderungen, welche die Blutdruckerhöhung an dasselbe stellt, im Allgemeinen gut entspricht und dabei eine beträchtlich grössere Arbeit pro Minute leisten kann. Diese Wirkung tritt vor Allem dann deutlich zu Tage, wenn das Herz vorher schlecht arbeitet, die Gefässe schlaff und der Druck niedrig ist. Der Mechanismus der günstigen Wirkung des Coffeïns auf den Circulationsapparat, besonders auf einen schlecht arbeitenden, scheint mir somit vor Allem darin zu bestehen, dass es durch Erregung der Gefässnervencentren den Blutdruck erhöht und gleichzeitig — oft wenigstens — durch Vermehrung der Pulszahl und auch, wenn nöthig und möglich, durh Erhöhung der Contractionsenergie (Steigerung der Irritabilität?) des Herzmuskels das Herz befähigt, den grösseren Anforderungen zu entsprechen. Die Steigerung des Widerstandes innerhalb gewisser Grenzen ist gewissermaassen eine Bedingung dafür, dass eine günstige Wirkung hervortreten soll; da jene wegfällt, bleibt auch diese nicht selten aus.[1]

Die Bedeutung der hier skizzirten Wirkungen des Coffeïns für die therapeutische Anwendung des Mittels bei gewissen Herzkrankheiten und vielleicht auch anderen Leiden, die entsprechende Functionsstörungen des Kreislaufs herbeiführen, scheint mir aus den angeführten Versuchen recht klar hervorzugehen. Es kommt in solchen Fällen darauf an, einer Gefässerschlaffung entgegen zu wirken und dadurch den Blutdruck mässig zu erhöhen, damit der Herzthätigkeit günstigere Bedingungen geschaffen werden möchten; das Gift trägt dann auch, wie es scheint, nicht selten dazu bei, das Herz grösseren Leistungen fähig zu machen. Gleichzeitig damit, dass das Coffeïn in der hier beschriebenen Art den Kreislauf günstig beeinflusst, verbessert es auch die Bedingungen für eine ausgiebigere Diurese. Mag das Gift auch die Nierenepithelien zu einer gesteigerten Thätigkeit reizen, so kommt doch eine Vermehrung der Harnsecretion nur dann zu Stande, wenn genügend grosse Blutmengen den Nieren zugeführt werden. Das kann

[1] Vgl. R. Gottlieb, Ueber Herzmittel und Vasomotorenmittel. *Verh. d. XIX. Congr. f. inn. Med.* Berlin 1901. S. 40 u. flg.



einerseits durch eine von Coffeïn bedingte starke Erregung der Gefässnervencentren mit bedeutendem Gefässkrampf verhindert werden (vgl. v. Schröder). Andererseits können wohl auch eine schlechte Herzthätigkeit, eine hochgradige Erschlaffung der Gefässe, ein sehr niedriger Blutdruck und eine langsame Circulation mit Stauung des Blutes in den grossen Venen der Harnsecretion nicht gerade günstig sein, wenn sie auch eine diuretische Wirkung des Coffeïns nicht ganz ausschliessen. Mehr geeignete Bedingungen dafür entstehen doch sicher, wenn die Herzthätigkeit verbessert, der Blutdruck ein mässig hoher, der Rückfluss des Blutes zum Herzen ein schnellerer, im Ganzen die Geschwindigkeit der Blutbewegung (vor Allem in den Nierencapillaren) eine grössere wird. Und eine solche Hebung der Kreislaufsfunctionen scheint das Coffeïn unter Umständen herbeiführen zu können. Ich erinnere in diesem Zusammenhange daran, dass Tigerstedt und Landergren[1] mittels Stromuhr in der Art. renalis an grossen Hunden durch intravenöse Injection von Coffeïn eine Beschleunigung des Blutstromes nachgewiesen haben; an diesen Thieren waren allerdings die Nierennerven durchschnitten.

4. Schlussbemerkungen.

Ein Vergleich der Herzwirkung des Coffeïns mit derjenigen der Digitalingruppe.

Meistens wird die Herzwirkung des Coffeïns derjenigen der Digitalingruppe als grundwesentlich verschieden entgegengestellt, und grosse Verschiedenheiten treten ja bei einem Vergleich sofort hervor. Wenn man aber der Sache etwas näher tritt, scheinen doch mehrere Berührungspunkte vorzukommen, welche die betreffenden Wirkungen der beiden Giftgruppen, wenn auch verschieden, doch als einander recht nahe liegend erscheinen lassen.

Beim Coffeïn tritt meistens sofort eine mehr oder weniger ausgesprochene Pulsbeschleunigung hervor, die nur mehr ausnahmsweise durch das Eingreifen des Hemmungsapparates verhindert werden kann, so dass sogar eine Herabsetzung der Pulsfrequenz zu Stande kommt. Die Gifte der Digitalingruppe lassen dagegen bekanntlich anfangs die Hemmungswirkung mächtiger hervortreten und setzt die Pulszahl, vor Allem die pathologisch gesteigerte, herab. Doch tritt, wie besonders Cushny[2] kürzlich hervorgehoben, auch bei den Giften

[1] R. Tigerstedt und Landergren, *dies. Archiv.* 1898. Bd. IV. S. 241; siehe Versuch IV S. 249, sowie Versuch VII S. 253.

[2] A. Cushny, *Journal of experimental medicine.* 1897. Vol. II. Nr. 3. S. 233 bis 299.

der Digitalinreihe zuletzt eine Steigerung der Irritabilität des motorischen Apparates des Herzens so stark hervor, dass die Hemmungswirkung überwunden wird und die Pulszahl in oft bedeutendem Grade ansteigt. Es scheint mir in dieser Richtung keine grundwesentliche Verschiedenheit, eher eine Verschiebung der Wirkungen in Bezug auf Stärke und Dauer vorzukommen, ungefähr so wie zwischen Curarin und Strychnin, die ja ein so wesentlich verschiedenes Vergiftungsbild hervorrufen und doch ihrem Wesen nach einander so nahe stehen.

Was die Volumina der einzelnen Pulse betrifft, werden sie bekanntlich durch kleine und mässige Gaben der Digitalingifte fast immer in charakteristischer Art vergrössert, während die Wirkung des Coffeïns auf Säugethierherzen in dieser Richtung umstritten ist und wahrscheinlich sich je nach den vorliegenden mechanischen Bedingungen verschieden gestalten kann. Hier muss aber bemerkt werden, dass der Einfluss der Digitalingifte auf die Pulsvolumina zu ihrer Wirkung auf die Frequenz und auf den Hemmungsapparat in sehr naher Beziehung steht. Die dabei meistens vorkommende Verlangsamung der Pulsfrequenz giebt dem Herzen Zeit, grosse, schön ausgebildete Pulse auszuführen, während dieses dem gejagten Coffeïnherzen oft nicht möglich ist, wenn auch, wie ich glaube, diesem Gifte eine gewisse Neigung zur Vergrösserung der Pulse nicht ganz fremd ist. Wie Cushny (a. a. O.) schön dargelegt hat, liegt eben in der Vagusreizung der Digitalingifte ein Moment, das zu einer Vergrösserung der Pulse — und zwar in diastolischer Richtung — führt. Ich habe aus Cushny's Arbeit einige Curven benutzt (Taf. IX Fig. 7 *a*, *b*, *c* und *d*), die diese interessante Sache sehr deutlich demonstriren. Die Curven stammen von Hundeherzen her und sind mit dem „Myocardiograph" von Roy und Adami ausgeführt worden. Die obere Curve rührt von dem rechten Ventrikel her, die untere giebt den Blutdruck (in Carotis) an; die Zeit in Secunden ist unten (schwach) angegeben. Die systolischen Spitzen der Curven sind nach unten, die diastolischen nach oben gerichtet. Die Curven *a* und *b* geben die Bewegungen des Herzens vor und nach der Zufuhr von Strophantin an; wir sehen, wie die Strophantinpulse die normalen sowohl in diastolischer als in systolischer Richtung bedeutend überragen. In einem anderen Versuche wurde das Thier zuerst mit Atropin vergiftet und nachher während der Aufzeichnung der Herzbewegungen Strophantin injicirt. Wir sehen (Taf. IX Fig. 7 *c* und *d*), dass die Strophantinpulse (*d*) gleiche Frequenz wie die normalen (*c*) aufweisen — die Vaguswirkung ist eliminirt — und dass jene nur in systolischer, nicht aber in diastolischer Richtung diese überragen. Die stärkere diastolische Dehnung des nur mit Strophantin

vergifteten Herzens (Taf. IX Fig. 7 *b*) stellt also wahrscheinlich keine directe Wirkung dieses Giftes dar; sie war eine secundäre, eine Folge der Vagusreizung. Nur der systolische Zuwachs der Pulse hing direct von dem Strophantin ab; derselbe trat auch an dem schnell arbeitenden Herzen des atropinvergifteten Thieres hervor.[1]

Die bekannte, von den Digitalingiften bedingte Steigerung der „Elasticität" des Herzens scheint also, bei Säugethieren wenigstens, nicht in einer grösseren Dehnbarkeit, in ausgiebigeren Diastolen hervorzutreten; diese hängen, wie eben erwähnt, von der gleichzeitigen Hemmungsreizung ab. Diese beiden Einflüsse streiten, wie Cushny betont, um das Herz: jene begünstigen die systolische, diese die diastolische Neigung des Herzens. Sehr deutlich tritt dieser Streit zwischen contrahirenden und erschlaffenden Einflüssen in den Versuchen von Neufeld und Hedbom[2] über den Antagonismus von Antiarin und Blausäure an Froschherzen hervor: die Blausäure kann den Antiarinstillstand aufheben und vice versa. Die Blausäure wirkt hier in derselben Richtung wie eine Vagusreizung der vom Antiarin bedingten systolischen Tendenz des Herzens entgegen; in einem Versuche hat Hedbom sogar durch Vagusreizung einen durch Ipoohgift hervorgebrachten Herzstillstand zufällig aufgehoben. Diese erschlaffenden Einflüsse — die Blausäurevergiftung oder die Vagusreizung — haben auf das durch ein Digitalingift eben in Systole still stehende Herz denselben Effect wie die mechanische Dehnung in dem bekannten Versuche Schmiedeberg's. Wenn man diese Thatsachen und die daraus hervorgehende Auffassung berücksichtigt, scheint mir der principielle

[1] Obgleich es ausserhalb meiner jetzigen Aufgabe liegt, kann ich nicht unterlassen, hier zu bemerken, dass das eben referirte Resultat Cushny's mir eine nicht unwesentlich veränderte Auffassung der Digitalinwirkung gegeben hat. Man hat früher bei der Vaguswirkung dieser Gruppe nur an die Herabsetzung der Pulsfrequenz gedacht und diesen Giften ein selbständiges, mit ihrer Herzmuskelwirkung zusammenhängendes Vermögen zugeschrieben, die diastolische Ausdehnung zu vergrössern. Dies scheint nach Cushny nicht richtig zu sein. Durch seine Angabe gewinnt die Vagusreizung an Bedeutung: sie giebt dem Herzen mehr Zeit, grosse Contractionen auszuführen, und sie vergrössert an sich schon diese Contractionen in diastolischer Richtung. Sie ist gewiss für die Entstehung der therapeutisch so werthvollen Digitalinwirkung eine unerlässliche Bedingung. Die contractionsbefördernde Herzmuskelwirkung der Digitalingifte ist natürlich auch nothwendig. Auf eine richtige Anpassung der Stärke dieser beiden Wirkungen beruht der Werth eines Präparates aus der Digitalinreihe.

[2] K. Hedbom, *Arch. f. exper. Path. u. Pharm.* 1901. Bd. XLV. S. 317 bis 345, besonders S. 329 u. flg.; der Ipoohgiftversuch S. 341.

Unterschied zwischen der Herzmuskelwirkung der Digitalingifte und derjenigen des Coffeïns in bedeutendem Maasse reducirt zu werden.

Aus dem Gesagten wird es einleuchtend, wie die Wirkungsart der Digitalingifte für eine Vergrösserung der Pulsvolumina viel günstiger ist als die des Coffeïns. Die Verlangsamung der Frequenz an sich giebt die nöthige Zeit zur Ausführung grosser Pulse, die Vagusreizung an sich vermehrt die diastolische Dehnung des Herzens, und die eigenthümliche Muskelwirkung der Digitalingifte bringt ausgiebigere Systolen hervor. Beim Coffeïn fallen meistens die beiden ersten Momente weg. Es kann sein, dass das dritte Moment, eine Neigung zu kräftigeren Systolen (zu grösseren Pulsvolumina) vorhanden ist; bei der Steigerung der Frequenz und des Widerstandes (durch die gleichzeitige Gefässcontraction) wird aber diese Neigung überwältigt und kommt nicht zum Vorschein; sie kann doch möglicherweise darin sich geltend machen, dass das Herz, wenn auch vielleicht die Pulsvolumina gleich bleiben oder sogar abnehmen, doch befähigt wird, den gesteigerten Anforderungen besser als sonst zu entsprechen. Ich will natürlicher Weise damit nicht behaupten, dass die specifische Wirkung der Digitalingifte auf den Herzmuskel mit derjenigen des Coffeïns identisch sein sollte, oder dass nicht jene Gifte doch vielleicht die Contractionsenergie des Herzens mächtiger hebt, als dieses zu thun vermag.

Andererseits kommt mir es etwas eigenthümlich vor, dass ein Gift, das Coffeïn, welches in kleinen Gaben die Dehnbarkeit des Skeletmuskels (beim Frosch) steigert und seine Leistungsfähigkeit erhöht, welches weiter die absolute Kraft des Froschherzens, sowie seine Pulsvolumina vergrössert, welches an isolirten, im Langendorff'schen Apparate arbeitenden Säugethierherzen doch unzweifelhaft die „Amplituden" des Herzmuskels und die Coronarcirculation bedeutend steigerte — dass dieses Gift bei Säugethieren seinem Wesen zufolge die „Elasticität" des Herzens und seine Pulsvolumina (Leistungsfähigkeit) stets herabsetzen soll. Zwar bringt das Coffeïn verhältnissmässig leicht eine Starre der Skeletmuskeln gewisser Thiere (besonders der Rana temporaria) hervor. Was ist aber der bekannte systolische Stillstand des Digitalinherzens? Gewiss nichts Anderes als eine unter stets abnehmender Dehnungsfähigkeit sich entwickelnde Art von Starre, die zwar anfangs von allerlei dehnenden Einflüssen zufällig überwunden werden kann, so dass das Herz wieder zu schlagen anfängt, die aber bald definitiv wird. Beim Froschherzen wenigstens scheinen die Digitalingifte eben so grosse Neigung als das Coffeïn zu besitzen, eine solche Starre hervorzurufen. Hier wieder ein Berührungspunkt der beiden Giftgruppen, welcher gewiss für die Beurtheilung ihrer Herzmuskelwirkung nicht ohne Interesse ist. Auch

hier besteht, wie mir scheint, kein weitgehender principieller Unterschied. So wie bei der Wirkung von den Digitalingiften, Veratrin und Chinin eine gesteigerte Leistungsfähigkeit der betr. Muskelgebilde meistens den „Absterbeerscheinungen" vorangeht — sie tritt ja sogar vor dem „normalen" Absterben dieser Gebilde zu Tage —, so kommt sie auch wahrscheinlich als Effect von kleinen und mässigen Coffeïngaben auf Säugethierherzen vor.

Wenn es mir gelungen ist, durch meine Erwägungen und Versuche dieser Auffassung eine gewisse Stütze zu geben, hat damit auch die Ansicht, dass das Coffeïn sich als ein „Herztonicum" benutzen lässt, eine etwas festere Grundlage gewonnen.

Stockholm, im August 1901.

Nachtrag.

Nachdem der vorstehende Aufsatz schon an die Druckerei abgefertigt war, hat A. Cushny mir gütigst eine Arbeit im Manuscript zugesandt, die bald unter dem Titel: „On the action of Coffeïne on the mammalian heart" in „Archives internat. de pharmacodynamie" erscheinen wird.[1] Die Versuche sind zusammen mit B. K. van Naten ausgeführt worden. Als Versuchsthiere dienten Hunde und Katzen deren Herzen meistens mit Hülfe des Myocardiographen von Roy und Adami ihre Contractionen aufzeichneten. Die Verff. gelangten zu dem oben aus dem „Text-book" Cushny's citirten Resultat. Nur verhältnissmässig grosse Dosen von Coffeïn setzten den sonst unveränderten Umfang der Herzcontractionen herab, indem sie die Pulsfrequenz so bedeutend steigerten, dass das Herz nicht mehr Zeit fand, genügend ausgiebige Bewegungen auszuführen. Verff. heben hervor, dass schon Aubert[2] diesen Anlass zu der Verminderung der Contractionen durch das Coffeïn erwähnt hat. Noch grössere Gaben beschädigen das Herz, führen zur Arythmie und zuletzt zum Stillstand desselben.

Die Verff. sprechen sich für die rein musculäre Wirkung des Coffeïns aus und führen als Stütze ihrer Ansicht die Thatsache an, dass dieses Gift überhaupt keine peripherischen Nervenendigungen beeinflusst, also wahrscheinlich auch im Herzen nicht solche Gebilde, sondern ausschliesslich die Musculatur angreift. In Bezug auf diese

[1] Ehe dieser Nachtrag veröffentlicht wird, ist voraussichtlich die betreffende Arbeit schon längst publicirt worden. Ein ausführlicheres Referat derselben ist daher hier nicht nöthig.

[2] Inaugural-Dissertation. Berlin 1885.

Frage möchte ich hier nur andeuten, dass, wenn man (wie ich) zu der Ansicht neigt, dass normaler Weise die Ganglien des Herzens den automatisch wirkenden Ausgangspunkt der Bewegungsimpulse dieses Organs darstellen, diese Gebilde gewissermaassen einem nervösen Centralorgan — wenn auch niederer Ordnung — gleich zu stellen wäre; und unter solchen Umständen liesse es sich wohl annehmen, dass das Coffeïn dieses intracardiale Centralorgan eben so gut wie mehrere Centren des verlängerten Markes und des Gehirnes reizen (bezw. ihre Reizbarkeit erhöhen) könnte.

Was den Vergleich zwischen der Digitalis- und der Coffeïnwirkung auf das Herz betrifft, sehen die Verff. den Unterschied derselben nur in Verschiedenheiten in Bezug auf Art und Localisation der Muskelwirkung an. Wie ich in meinem Aufsatze oben aus einander zu setzen versucht habe, scheint es mir nothwendig, auch die verschiedene Wirkung der beiden Gifte auf den Hemmungsapparat zu betonen.

Wenn ich also auch in ein paar Punkten zu einer anderen Auffassung als die Verff. neige, möchte ich andererseits zum Schluss hervorheben, dass mir die Versuche von Cushny und van Naten in methodischer Hinsicht sehr befriedigend zu sein scheinen, wodurch ihre Untersuchung entschieden einen Fortschritt vor derjenigen früherer Forscher, auch vor der meinigen, bezeichnet. Eine wie weitgehende Analyse der Herzthätigkeit ihre Methode ermöglicht, scheint mir aus den interessanten Versuchen der Verff. über die Beziehung der Coffeïnwirkung zur Acceleransreizung und zur Reizung der Vorhöfe an den Eintrittsstellen der grossen Venen hervorzugehen. — Leider ist bei uns die Schwierigkeit, ein genügend reichliches Material geeigneter Versuchsthiere zu bekommen, ein ernstes Hinderniss gegen die Anwendung der von ihnen benutzten besseren Methode gewesen.

Stockholm, im October 1901.

Erklärung der Abbildungen.

Abschnitte der Piston-Recordercurven.

(Taf. VIII u. IX.)

Taf. VIII.

Fig. 1*a* [Vers. I, Obs. 1 und 2]. Recorderpulse vor allen Injectionen.

Fig. 1*b* [„ I, „ 5]. Nach Injection v. 1 ccm NaCl-Lösung (0·9 Proc.).

Fig. 1*c* [„ I, „ 9]. Nach einer 2. Einspritzung von NaCl-Lösung, 5 ccm.

Fig. 1*d* [„ I, „ 12]. Vor der 1. Coffeïninjection.

Fig. 1*e* [„ I, „ 14]. Während der 1. Coffeïninjection.

Fig. 1 *f* [Vers. I, Obs. 16]. Effect der 1. Injection (1 ccm).

Fig. 1 *g* [„ I, „ 18]. Resultat einer 2. Einspritzung (3 ccm).

Fig. 1 *h* [„ I, „ 24]. Nach einer 4. Coffeïninjection (10 ccm).

Fig. 1 *i* [„ I, „ 26]. Fortschreitende Verbesserung der Herzaction nach der 4. Coffeïninjection.

Fig. 2 *a* [Vers. II, Obs. 1]. Recorderpulse vor den Injectionen.

Fig. 2 *b* [„ II, „ 3]. Kurz vor der 1. Coffeïninjection.

Fig. 2 *c* [„ II, „ 6]. 2 Minuten nach der 1. Einspritzung.

Fig. 2 *d* [„ II, „ 10]. Nach einer 2. Injection.

Fig. 2 *e* [„ II, „ 14]. Herzaction nach kurzdauernder Erstickung.

Fig. 2 *f* [„ II, „ 30]. Kurz vor der 6. Injection.

Fig. 2 *g* [„ II, „ 32 und 33]. Während der 6. Einspritzung.

Fig. 2 *h* [„ II, „ 37]. Folge dieser Coffeïninjection (5 ccm).

Fig. 2 *i* [„ II, „ 42]. Eintritt des Herzstillstandes kurz nach einer Injection von Strophantin (1 pro mille, 1 ccm).

Fig. 3 *a* [Vers. III, Obs. 2]. Recorderpulse vor den Coffeïneinspritzungen.

Fig. 3 *b* [„ III, „ 9]. Pulse nach der 2. Injection (1 ccm).

Fig. 3 *c* [„ III, „ 21]. Kurz vor der 5. Einspritzung.

Fig. 3 *d* [„ III, „ 22]. Ende der 5. Injection. Vorübergehende Herabsetzung der Recorderpulse mit Anschwellung des Herzens; dann grosse Pulse.

Fig. 3 *e* [Vers. III, Obs. 26]. Enorme Pulse kurz nach einer Erstickung.

Taf. IX.

Fig. 3 *f* [Vers. III, Obs. 27]. Grosse, regelmässige, weniger stürmische Pulse.

Fig. 3 *g* [„ III, „ 32]. Nach einer Injection von 10 ccm Coffeïnlösung; wieder sehr grosse Pulse.

Figg. 4 *a* und *b* [Vers. IV, Anfang]. *a* vor den Injectionen; *b* nach zwei Einzelgaben von Coffeïn (0·5 und 1 ccm).

Fig. 4 *c* [Vers. IV, Obs. 2]. Nach einer kurzen Periode der Erstickung; bedeutend vergrösserte Pulse.

Fig. 4 *d* [Vers. IV, Obs. 5]. Kurz nach der 3. Coffeïneinspritzung.

Fig. 4 *e* [„ IV, „ 10]. Nach der 4. Injection. Spontane Athmung.

Fig. 5 *a* [„ V, Anfang]. Recorderpulse vor den Injectionen.

Fig. 5 *b* [„ V, Obs. 1]. Nach 2 kleinen Coffeïninjectionen und nach einer kurzdauernden Erstickung.

Fig. 5 *c* [Vers. V, Obs. 12]. Nach der 5. Einspritzung.

Fig. 5 *d* [„ V, „ 21]. Später, nach einer Gabe von 10 ccm Coffeïn, sowie nach einer kurzen Erstickungsperiode.

Fig. 6 *a* [Vers. VI, Obs. 1]. Recorderpulse vor den Injectionen.

Fig. 6 *b* [„ VI, „ 8]. Vagi übergeschnitten; 0·5 ccm Coffeïnlösung injicirt. Die Pulse bedeutend frequenter und grösser.

Fig. 6 *c* [Vers. VI, Obs. 12]. Nach der 2. Coffeïninjection. Recorderpulse in regelmässigen Gruppen.

Fig. 7 *a*, *b*, *c*, *d* nach Cushny, s. oben S. 292. Die Bilder sind um $^1/_3$ reducirt.

Ueber die respiratorische Pause nach tiefen Inspirationen.[1]

Von

Gustav Neander.

(Aus dem physiologischen Laboratorium in Upsala.)

(Hierzu Taf. X.)

Einleitung.

Zu den interessantesten Erscheinungen auf dem Gebiete der Respirationslehre ist unbestritten die Apnoe zu zählen, welche auch wiederholt Gegenstand der Beobachtung und Untersuchung für verschiedene Forscher gewesen ist.

Das Wort Apnoe ist von Alters her bekannt und in der physiologischen Litteratur angewandt worden. Bereits Galenus benutzte es, obgleich in einer Bedeutung, welche von der gegenwärtigen abweicht, z. B. in *De locis affectis* (Lib. IV Vol. VIII S. 281, herausgegeben von E. Kühn), wo gesagt wird: „Es giebt noch ein anderes Leiden der Respiration, Apnoea genannt, wenn dem Augenscheine nach keine stattfindet, während dies der Natur der Sache nach unglaublich ist."[2] Die moderne Bedeutung des Wortes Apnoe wurde im Jahre 1862 von Rosenthal in seiner grundlegenden Arbeit gegeben: „Die Athembewegungen und ihre Beziehungen zum Nervus vagus (1)"[3] und dürfte so auszudrücken sein, dass Apnoe der Zustand ist, in welchem ein lebendes Thier sich befindet, bei dem die Respirationsbewegungen für längere oder kürzere Zeit zu

[1] Der Redaction am 27. Juli 1901 zugegangen.

[2] Cit. von Rosenthal in Hermann's *Handbuch* IV. S. 264.

[3] Die Ziffern in der Klammer deuten auf das Litteraturverzeichniss hin.

Zeit zu Folge Inactivität des respiratorischen Centrums aufgehoben sind.

Rósenthal fasste das Apnoe-Phänomen als einen ganz offenbaren Beweis für seine Theorie auf, betreffend die Abhängigkeit der Respirationsbewegungen von dem Sauerstoffgehalt des Blutes. Sobald das Blut durch die energischere Lungenventilation reichlicher mit Sauerstoff versehen worden war, fiel — nach Rosenthal — das für das Respirationscentrum specifisch reizende Moment, der Sauerstoffmangel, für einige Zeit weg, und während dieser Zeit mussten natürlich die Respirationsbewegungen eingestellt sein.

Zahlreiche Untersuchungen von anderen Forschern haben indess dargethan, dass das Apnoe-Phänomen von weit complicirterer Natur ist, als Rosenthal Anfangs annahm, und es als wahrscheinlich hingestellt, dass auch andere Momente als die Blutgase zu dessen Entstehen mitwirken.

Schon früh wurde die Aufmerksamkeit auf die Bedeutung gelenkt, welche man vielleicht den Nn. vagi bei der Entstehung der Apnoe zuerkennen muss. Es zeigte sich nämlich, dass, so lange diese Nerven intact waren, der Athmungsstillstand durch Einblasen von Gasmischungen, welche verhältnissmässig arm an Sauerstoff waren, hervorgerufen werden konnte, während andererseits, nachdem die Nn. vagi eliminirt waren, auch eine äusserst kräftige Lungenventilation ungenügend war, um eine bemerkbare Apnoe hervorzurufen. So z. B. gelang es Thiry (2) im Jahre 1865, bei Thieren durch Einblasen einer Gasmischung, welche aus gleichen Theilen Luft und Wasserstoffgas bestand, Apnoe zu etabliren.

Dass die Integrität der Nn. vagi eine sehr grosse Bedeutung für die Möglichkeit hatte, bei Thieren durch Lufteinblasen Apnoe hervorzurufen, wurde durch zahlreiche Experimente dargethan. Diese Bedeutung wurde sogar eine Zeit lang für so gross gehalten, dass Brown-Séquard (6) im Jahre 1871 sich zum Vertreter der Auffassung machen konnte, dass die Anwesenheit der Nn. vagi in unbeschädigtem Zustande eine ganz unerlässliche Bedingung für die Entstehung der Apnoe ist, und dass das Lufteinblasen nicht durch reicheres Versetzen des Blutes mit Sauerstoff, sondern als Reflexhemmung durch mechanische Reizung, Dehnung der pulmonalen Vagusfäden Apnoe verursachen konnte.

Diese Frage ist später Gegenstand zahlreicher Untersuchungen gewesen, kann aber nicht als ganz erledigt betrachtet werden. Dem Brown-Séquard'schen Extrem gegenüber, dass die Nn. vagi unvermeidliche Bedingungen für die Entstehung der Apnoe sein sollten,

steht Rosenthal's (14) Behauptung, dass er keine grössere Schwierigkeit gefunden habe bei Thieren, deren Vagi geschnitten waren, Apnoe hervorzurufen als bei solchen, bei denen diese Nerven intact waren.

Die Untersuchungen, welche von Filehne (8), Knoll (17), Rosenbach (9) und Gad (15) gemacht worden sind, scheinen dafür zu sprechen, dass die Wahrheit mitten zwischen den beiden genannten Extremen liegt. Die Erfahrung, über welche die meisten Forscher einig sind, dürfte also die sein, dass man bei einem Thier, dessen Vagi eliminirt worden sind, Apnoe hervorrufen kann, aber mit grösserer Schwierigkeit, und dass die Apnoe dabei von kürzerer Dauer als bei einem Versuchsthiere ist, bei welchem diese Nerven sich in unbeschädigtem Zustande befinden.

Indess sind auch von verschiedenen anderen Gesichtspunkten aus gegen Rosenthal's chemische Theorie von der Entstehung der Apnoe Einwendungen gemacht worden. So z. B. glaubte P. Hering (4) (im Jahre 1867) constatirt zu haben, dass das arterielle Blut während der Apnoe nicht reicher an Sauerstoff ist als unter normalen Verhältnissen, sondern im Gegentheil etwas ärmer, und zog Grund dessen die Richtigkeit der Rosenthal'schen Auffassung in Zweifel. P. Hering's soeben angeführte Erfahrung ist darauf indess von keinem Forscher bestätigt worden. Seine Untersuchung wurde (1868) von Pflüger (5) kritisirt, welcher in Hering's Arbeitsmethode eine Fehlerquelle nachwies, und im Jahre 1873 veröffentlichte August Ewald (7) eine Untersuchung über den Sauerstoffgehalt bei dem arteriellen Blute, welche Untersuchung unter Pflüger's Leitung ausgeführt wurde. Aus dieser ging hervor, dass das arterielle Blut während der Apnoe constant, wenn auch nur unbedeutend (0·1 bis 0·9 Proc.) reicher an Sauerstoff ist als unter gewöhnlichen Verhältnissen.

Ausgehend von den Untersuchungen über die Sauerstofftension im Arterienblute, welche E. Herter (12) (1879) veröffentlichte, wendet sich (auch 1879) Hoppe-Seyler (11) gegen die Rosenthal'sche Auffassung von der Ursache der Apnoe. Da das Arterienblut nach diesen Untersuchungen unter normalen Verhältnissen vollständig von Sauerstoff gesättigt ist, dürfte — nach Hoppe-Seyler — nicht einmal die kräftigste und energischste Lungenventilation dem Arterienblute eine so grosse Vermehrung des Sauerstoffgehaltes zuführen können, wie erforderlich wäre, wenn dieser Sauerstoffzuschuss die einzige oder wesentliche Ursache des Eintrittes der Apnoe sein sollte. Als Ursache der Apnoe nimmt Hoppe-Seyler anstatt dessen die Ermüdung an, oder sogar die Misshandlung des Respirationsapparates, welcher notwendiger Weise durch die forcirte künstliche Respiration verursacht wird.

Dieser Hoppe-Seyler'schen Annahme gegenüber führt Filehne (13) die Ziffern an, welche Hüfner (10) durch spektrophotometrische Bestimmung des Hämoglobin- und Sauerstoffgehaltes im Blute erhalten hat. Nach diesen Untersuchungen ist das Arterienblut beim Hunde unter normalen Verhältnissen nicht völlig mit Sauerstoff gesättigt, sondern enthält stets reducirtes Hämoglobin, weshalb also wenigstens die Möglichkeit einer vermehrten Sauerstoffbindung im Blute durch forcirte Respiration vorhanden ist.

Um den Einfluss der Ermüdung zu eliminiren, welcher von Hoppe-Seyler als äusserst kräftig angenommen worden ist, suchte Bieletsky (16) bei einem Raubvogel (Astur palumbarius) Apnoe hervorzurufen, indem er einen constanten Luftstrom durch die Lungen blies, nachdem er zuvor die Humeri abgebrochen und so die mit den Lungen communicirenden Luftsäcke geöffnet hatte. Er erhielt in diesem Falle bei dem Versuchsthiere mit Leichtigkeit Apnoe, obgleich die Respirationsbewegungen so ausgeschlossen waren.

Unter den übrigen, welche wichtige Einwendungen gegen Rosenthal's Theorie gemacht haben, seien Marckwald (20) und Mosso (21) genannt. Der erstere betont, dass die Athmung lange fortfahren kann, auch nachdem die Blutcirculation um das respiratorische Centrum abgesperrt worden ist, und behauptet, dass weder die Respiration, noch die Apnoe mit den Gasen des Blutes etwas zu schaffen habe. Der Letztere deutet darauf hin, dass grosse Variationen im Respirationsrhythmus vorkommen, welche nicht als Anpassungen nach Variationen im Sauerstoffbedarf des Organismus aufgefasst werden können und schliesst daraus, dass die Regulirung der Respiration unabhängig von der chemischen Beschaffenheit des Blutes ist.

Aus der Kritik, welcher die chemische Theorie der Entstehung der Apnoe ausgesetzt gewesen ist, wie aus den verschiedenen Erklärungsversuchen, welche gemacht worden sind, ging indess die Möglichkeit hervor, dass man mit mehreren Arten von Apnoe zu zählen habe, welche von mehreren ungleichartigen Ursachsmomenten hervorgerufen seien.

Dies wird auch von Miescher-Rüsch (18) in seiner orientirenden Arbeit erwähnt: Bemerkungen zur Lehre von den Athembewegungen (1885). Diejenige Art der Apnoe, welche dadurch entsteht, dass das Blut in Folge der Beschaffenheit seiner Gase keine Reizung auf das respiratorische Centrum ausübt, nennt er *Apnoea vera*, und unter dem Namen *Apnoea spuria* fasst er die Zustände in der Respiration zusammen, welche durch reflectorische, von den Nn. vagi oder von anderen Nerven ausgegangene Hemmung bewirkt werden.

Diese Distinction verdient es wohl, scharf betont zu werden. Der Begriff *Apnoea spuria* dürfte indess meiner Ansicht nach dahin zu erweitern sein, dass er alle anderen Formen von Apnoe, also gerade diejenigen umfasst, welche von ausgebliebener Reizung des Centralapparates zu Folge Beschaffenheit der Blutgase bedingt sind. Wenn es sich z. B. zeigen sollte, dass die durch sehr forcirte Athmung natürlich hervorgerufene Ermüdung des Respirationscentrums im Stande ist, einen apnoeähnlichen Athmungszustand zu verursachen, muss auch dies natürlich als eine *Apnoea spuria*, wenn auch von anderer Art, betrachtet werden.

Die Mehrzahl der Versuche, zum näheren Studium dieses Zustandes Apnoe hervorzurufen, ist an Thieren, meist Kaninchen, durch energische künstliche Respiration gemacht worden. Es ist indessen eine längst bekannte Thatsache, dass Apnoeversuche ohne Schwierigkeit auch am Menschen vorgenommen werden können. Wenn man eine grössere oder geringere Zahl tiefer und kräftiger Respirationen macht, ist sehr leicht zu beobachten, dass diejenigen gewöhnlichen Bewegungen des Brustkastens unmittelbar darnach für einige Secunden eingestellt sind. Rosenthal (14) erwähnt diese Thatsache mit folgenden Worten: „Wenn ich nur eine einzige tiefe Inspiration mache, wird die darauf folgende Athempause auf das Drei- bis Sechsfache ihrer normalen Dauer verlängert. Wenn ich einige solcher tiefen Athemzüge hinter einander mache, erhalte ich eine Apnoe von 5 bis 10 Secunden Dauer und darüber.“ Dieselbe Sache wird von Fredericq (24) erwähnt, welcher sagt: „On peu faire sur l'homme une expérience analogue. Si l'on exécute une série d'inspirations très profondes, on n'éprouve plus, pendant plusieurs secondes, le besoin de respirer: on est à l'état d'apnée.“

Und wirklich hat man im täglichen Leben nicht selten Gelegenheit, die erwähnte Thatsache zu beobachten. Wenn man auf Jemand Acht giebt, welcher gähnt oder tief seufzt, so ist leicht zu bemerken, dass ein kurzer Athmungsstillstand unmittelbar nach diesen Formen von tieferer Respiration folgt.

Nähere Untersuchungen über diese der Lufteinblasungsapnoe bei Thieren analoge Respirationspause scheinen bisher indess nicht gemacht worden zu sein. Eine solche Untersuchung dürfte indessen mancherlei von Interesse bieten, weil es scheinen will, als ob man dadurch Gelegenheit erhielte, der Frage hinsichtlich der Ursachen der Entstehung der Apnoe von etwas anderen Ausgangspunkten als den gewöhnlichen etwas näher zu kommen.

Ueber eine Reihe Untersuchungen in dieser Richtung will ich im

Folgenden berichten. Bei Vorlegung dieser Arbeit, welche in dem physiologischen Institut zu Upsala ausgeführt wurde, ist es mir eine angenehme Pflicht, dem Präfecten dieses Institutes, Herrn Professor Hj. Oehrwall, für das Wohlwollen und Interesse, womit er den Gang der Arbeit verfolgt hat, wie für die zahlreichen und werthvollen Rathschläge und Auskünfte, womit er dieselbe erleichtert hat, meinen wärmsten Dank auszusprechen.

I. Versuchsanordnung.

Sämmtliche Versuche, betreffend die Länge der Athmungspause nach tiefen Respirationen, habe ich an mir selbst ausgeführt.

Ich placirte einen Marey'schen Pneumographen auf die blosse Brust mitten über dem Sternum in gleicher Höhe mit den Brustwarzen und fixirte denselben dort sicher, doch nur so hart, dass er die Athembewegungen nicht im mindesten hinderte. Die Bewegungen des Brustkorbes wurden auf einen berussten Cylinder gezeichnet, welcher auf einem Baltzar'schen Kymographion rotirte. Zugleich wurde die Zeit mittels einer Secundenuhr registrirt.

So viel als möglich suchte ich die grösste Gleichförmigkeit in der Anordnung bei den verschiedenen Versuchen zu behalten. So z. B. wurde der Stuhl, auf welchem ich während des Versuches sass, stets in derselben Weise im Verhältniss zum Tisch, der Pneumograph immer in derselben Weise auf die Brust placirt u. s. w.

Bei der Arbeit mit Gasmischungen von anderer Zusammensetzung als der der atmosphärischen Luft wurden diese in einem Spirometer[1] eingeschlossen. Ein weiter Kautschukschlauch, welcher vom Spirometer führte, endigte mit einem Loven'schen Ventil, durch welches die Gasmischung vom Spirometer inspirirt wurde, nachdem die Nasenöffnungen mit einem Klemmer verschlossen worden waren.

Das Sauerstoffgas, welches zur Darstellung der Gasmischungen erforderlich ist, wurde theils fabrikmässig dargestellt und comprimirt auf einem eisernen Cylinder (von Elkan's Sauerstofffabrik, Tegeler Strasse 15,

[1] Hierbei wurde ein Holmgren'scher Doppelspirometer verwandt (siehe *Upsala Läkareförenings förhandlingar*. 1878. Bd. VIII. S. 465), auf welchem beide Glocken so mit einander verbunden wurden, dass der Apparat im Ganzen wie ein einfacher Spirometer wirkte. So wurde ein Gasvolumen erhalten, welches zu 15 bis 16 tiefen Respirationen hinreichte. Bei den Versuchen mit 25 und 40 tiefen Athemzügen wurde mit dem Spirometer eine Gasglocke verbunden, von welcher der Spirometer während des Versuches von einem Assistenten successive gefüllt wurde.

Berlin), theils auch mittels Zertheilung des Wassers durch einen elektrischen Strom erhalten, in welchem Falle es durch starke Erhitzung in einem kupfernen Rohr, durch welches das Gas geleitet wurde,[1] von Ozon befreit wurde.

Als Reagens auf Ozon wurde Schönbein's Jodkaliumstärkepapier (17 J.K. + 10 Stärke + 200 Wasser)[2] verwandt.

Das benutzte Wasserstoffgas wurde durch Zertheilung von Wasser mittels des elektrischen Stromes dargestellt.

Die Versuche wurden in folgender Weise ausgeführt: Ich setzte mich auf einen Stuhl vor den Tisch, auf welchen die Registrirungsapparate placirt waren, und fixirte den Pneumographen in angegebener Weise auf der Brust, stellte die Schreibfedern ein und versetzte dann den Cylinder in Rotation. Nachdem ich eine Weile in gewöhnlicher Weise gleichmässig und ruhig geathmet hatte, machte ich die für jedes Mal bestimmte Anzahl tiefer Inspirationen und verhielt mich dann den Respirationsbewegungen gegenüber so passiv wie möglich.

Die Schwierigkeit bei diesen Versuchen bestand natürlich darin, in möglichster Weise den Einfluß des Willens auf die Länge der Pause zu eliminiren. Zu diesem Zwecke machte ich vor den eigentlichen Versuchen eine grosse Anzahl Uebungsversuche, durch welche ich mich allmählich gewöhnte, mich während des Versuches völlig passiv zu verhalten. Damit nichts hinzukommen sollte, was diese erworbene Gewohnheit stören konnte, suchte ich, wie bereits ausgeführt, eine detaillirte Gleichförmigkeit bei den verschiedenen Versuchen zu behalten. Dadurch, dass ich ausserdem während des Versuches selbst in einem Buch oder in einer Zeitung las, die Augen schloss und den Gedanken eine ganz andere Richtung gab, und besonders dadurch, dass ich sorgfältig vermied, während des Versuches das Resultat zu beobachten, welches auf den berussten Cylinder gezeichnet wurde, lernte ich es allmählich, die Versuche vollkommen mechanisch auszuführen, ohne dem Verlaufe irgend welche Aufmerksamkeit zu widmen. Uebrigens wurden alle Versuche, bei welchen ich selbst nicht ganz passiv gewesen zu sein vermeinte, ausser Rechnung gelassen.

---

[1] Das Ozon wurde entfernt, weil es für möglich gehalten wurde, dass dasselbe die Ursache zu der reizenden Wirkung auf die Schleimhaut des Larynx und Pharynx bilden könnte, welche auf diese Weise erhaltener Sauerstoff bisweilen zu besitzen sich erwies. Es dürfte zu bemerken sein, dass der Sauerstoff, erhalten durch Zertheilung von schwefelsäuresaurem Wasser, stets einen positiven Ausschlag auf das Reagenzpapier gab, während das Gas, welches durch Zertheilung von alkalischem Wasser erhalten wurde, einen negativen oder sehr schwachen Ausschlag gab.

[2] W. Hempel, *Gasanalytische Methoden.* S. 145. Braunschweig 1900.

II. Die respiratorische Pause nach tiefen Inspirationen.

Eine nähere Untersuchung der Resultate, welche durch die eben beschriebene Versuchsanordnung erhalten wurden, giebt an die Hand, dass schon nach einem einzigen tiefen Athemzug constant eine Pause in der Exspirationsstellung erhalten wird.

Als Durchschnittsziffer von einer Anzahl Versuchen habe ich gefunden, dass die Länge dieses Stillstandes bei mir etwa 4 Secunden, d. h. ungefähr die Zeit beträgt, welche eine normale In- und Exspiration zusammen umfassen.

Fig. 1 Taf. X giebt das Aussehen der Curven wieder, welche bei diesen Versuchen auf den berussten Cylinder gezeichnet worden sind (die Curve ist von links nach rechts zu lesen, die abwärts gehenden Linien bezeichnen die Inspiration, die aufwärts gehenden die Exspiration; die Zeit ist in Secunden markirt. Die kleinen Wellen in der Curve entsprechen den Herzschlägen).

Aus dieser Curve geht hervor, dass, sobald der Brustkorb die Exspirationsbewegung nach der tiefen Inspiration vollendet hat, ein einige Secunden langer völliger Stillstand in der Exspirationsstellung eintritt; nach Ablauf dieses Stillstandes beginnt die Athmung mit einer ziemlich unbedeutenden Inspiration. Bei der nächsten Respiration ist die Amplitude des Ausschlages etwas grösser, aber erst bei der dritten oder vierten Respiration nach der Pause wird dieselbe Amplitude erreicht, welche die normalen Athmungsbewegungen unmittelbar vor der tiefen Inspiration zeigten. Danach setzt die Respiration unter völlig normaler Form fort.

Im Vorhergehenden ist angedeutet worden, dass Rosenthal (15) die Länge der erwähnten Pause in einem gewissen Zusammenhange mit der Anzahl der vorhergehenden tiefen Athemzüge stehend befunden hat und zwar so, dass der Stillstand länger wurde, wenn er „einige" tiefe Inspirationen machte, als wenn er nur „einen einzigen" that. Es scheint der Mühe zu verlohnen, die Art und Ausdehnung dieses Zusammenhanges näher zu untersuchen.

Zu diesem Zwecke habe ich durch eine Reihe Versuche die Länge der Athmungspause nach der verschiedenen Anzahl der vorhergehenden tiefen Athemzüge, von 1 bis einschliesslich 60, bestimmt. Die Figg. 2 und 3 Taf. X werden als Beispiel der Curven mitgetheilt, welche bei diesen Versuchen erhalten wurden.

Die hierdurch gewonnenen Resultate legen dar, dass die Länge der respiratorischen Pause bis zu einer gewissen Grenze mit der steigenden Anzahl der vorhergehenden tiefen Respirationen wächst.

Die Werthe der Pausenlänge (Mittelwerth von ungefähr 10 Versuchen für jede Anzahl tiefer Inspirationen), welche ich erhielt, waren folgende:

Anzahl tiefer Respirationen	Pausenlänge Sec.	Anzahl tiefer Respirationen	Pausenlänge Sec.
1	4	12	9
2	5·8	14	9·1
3	6·2	17	10·2
4	7	20	11·1
5	7·3	25	12·4
5	7·3	30	15·5
8	7·6	40	15·5
10	8	60	15·5

Geographisch dargestellt geben diese Resultate eine Curve von folgendem Aussehen:

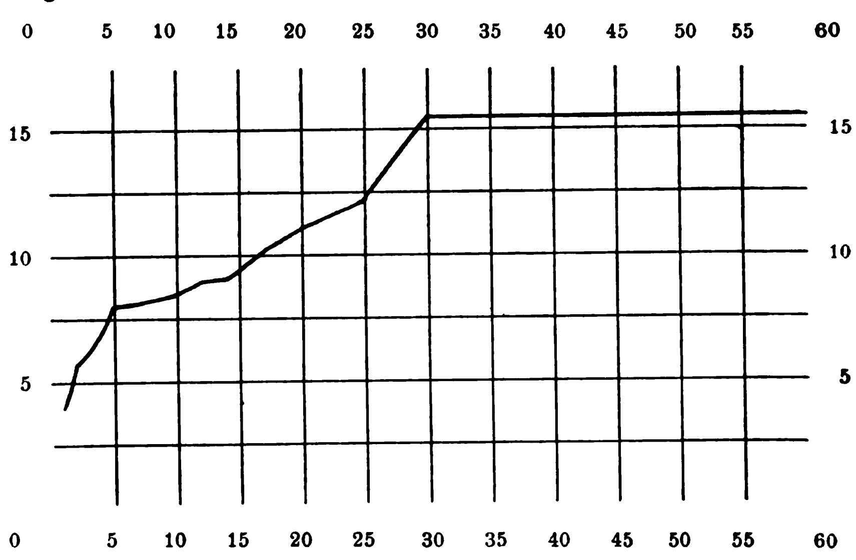


Fig. 4. Zunahme der Pause nach der wachsenden Anzahl tiefer Inspirationen. Abscisse: Anzahl der tiefen Respirationen. Ordinate: Zeit (in Sec.).

Nach etwa 30 Secunden hatte die Pause also eine Länge von ungefähr 15 Secunden erreicht; darauf schien sie nicht mehr zuzunehmen, sondern hatte deutlich ihr Maximum erreicht. Die Zunahme schien Anfangs am stärksten zu sein, so dass die Pause schon nach 5 tiefen

Respirationen eine Länge von 7·3 Sec. hatte. Dann erfolgt das Steigen langsamer, aber ziemlich gleichmässig bis zu ungefähr 25 Respirationen, wo ein steilerer Anstieg beginnt, welcher bis 30 reicht, wo die Curve ein Plateau bildet.

Es ist natürlich, dass sowohl die Länge dieser Pause nach der ungleichen Anzahl tiefer Athemzüge, wie auch der Punkt, bei welchem dieselbe ihr Maximum erreicht, wie anzunehmen, nicht unbedeutenden individuellen Schwankungen ausgesetzt sein muss, was auch aus verschiedenen Controlversuchen mit anderen Personen hervorgegangen ist. Indess haben diese Controlversuche stets die oben erwähnte Behauptung bestätigt, dass auf einen oder mehrere tiefe Athemzüge stets eine exspiratorische Pause folgt, welche ihrer Länge nach innerhalb gewisser Grenzen von der Zahl der vorhergehenden tiefen Respirationen abhängig ist.

Es liegt nun nahe an der Hand, dass man sich fragt: ist diese Pause, welche natürlich ebenso gut wie der durch energische künstliche Athmung bei Thieren erzeugte Athmungsstillstand eine Apnoe ist, richtiger als eine *Apnoea vera* oder *Apnoea spuria*, oder vielleicht als eine Combination von beiden aufzufassen? Welche Momente können als mitwirkende Ursachen zur Entstehung dieser Pause nachgewiesen werden? Ist die Ursache nur darin zu suchen, dass das Blut durch die eingehendere Lungenventilation reichlicher mit Sauerstoff versehen oder von Kohlensäure befreit worden ist, so dass das für das respiratorische Centrum reizende Moment für eine Weile weggefallen ist, oder nur in einer durch Reflex hervorgerufenen Hemmung? Wirken möglicher Weise diese beiden oder noch andere Ursachen zusammen, und in letzterem Falle, welches sind diese anderen mitwirkenden Ursachen?

Der Zweck der nachfolgenden Untersuchungen ist der, zu versuchen, zur Beantwortung dieser Fragen einen Beitrag zu liefern.

Von besonderem Interesse für die Beantwortung dieser Fragen war es natürlich, zu untersuchen, ob die Länge der beschriebenen Pause in irgend welcher Weise von der Zusammensetzung der Luft abhängig wäre, mit welcher die Lungen durch die tiefen Athemzüge gefüllt werden. Dass ein grösserer oder geringerer Sauerstoffgehalt bei der inspirirten Luft eine bestimmte Bedeutung haben würde, erschien a priori sehr wahrscheinlich.

Ich bereitete daher Anfangs eine verhältnissmässig sauerstoffreiche Luftmischung, welche im Spirometer eingeschlossen gehalten wurde. Ich mischte 10 Liter gewöhnliche Luft mit 2 Liter reinem Sauerstoffgas, wonach die Mischung ungefähr 34 Proc. Sauerstoff enthielt. In

derselben Weise, wie oben beschrieben, führte ich nun eine Reihe Apnoeversuche aus, nur mit dem Unterschiede, dass ich bei den tiefen Athemzügen oben erwähnte sauerstoffreiche Luft inspirirte.

Das Gasvolumen, worüber ich disponirte, erlaubte mir nicht, eine grössere Anzahl tiefer Respirationen zu machen als 40, die indess völlig hinreichten, da die Länge der Pause offenbar schon vorher ihr Maximum erreicht hatte.

Ich erhielt bei diesen Versuchen folgende Werthe für die Länge der Pause nach verschiedener Anzahl vorhergehender kräftiger Inspirationen in der sauerstoffreicheren Luft. Zum Vergleiche theile ich auch die bei Versuchen in gewöhnlicher atmosphärischer Luft erhaltenen Werthe mit, wie auch die Differenz zwischen den Werthen in den beiden verschiedenen Versuchsreihen:

Anzahl der tiefen Respirationen	Länge der Pause nach		Differenz
	Athmung in gewöhnl. Luft (21 Proc. O) Sec.	Athmung in sauerstoffreicher Luft (34 Proc. O) Sec.	Sec.
1	4	6	2
2	5·8	7	1·2
3	6·2	8	1·8
4	7	10	3
5	7·3	13	5·7
6	7·3	13	5·7
8	7·6	13·5	5·9
10	8	14	6
12	9	14	5
14	9·1	14	4·9
17	10·2	14·5	4·3
25	12·4	15	2·6
40	15·5	15·5	0

Die Curve, welche durch graphische Darstellung dieser Ziffernwerthe erhalten wurde, wird in Fig. 5 (S. 311 oberste Curve) wiedergegeben. Ein Vergleich zwischen dieser neuen Curve und der vorher bei Versuchen in gewöhnlicher atmosphärischer Luft erhaltenen (die mittelste Curve in Fig. 5) zeigt, dass schon nach einem einzigen Athemzuge in der sauerstoffreicheren Luft die Athmungspause bedeutend länger geworden ist als bei Athmung in gewöhnlicher Luft. Der Unterschied beträgt ungefähr 2 Secunden. Danach wächst die Pause nach den Inspirationen in der sauerstoffreichen Luft so schnell, dass

dieselbe bereits nach 10 Inspirationen das Maximum erreicht, welches bei Versuchen in gewöhnlicher Luft erst nach ungefähr 30 Inspirationen erhalten wurde. Durch einen ziemlich langsamen Anstieg erreicht die Curve schon bei ungefähr 20 tiefen Inspirationen das Plateau der ersten Curve, welchem sie dann folgt.

Es ist also deutlich, dass erhöhter Sauerstoffgehalt in der inspirirten Luft wesentlich die Schnelligkeit erhöht, mit welcher die Apnoe nach tiefen Respirationen ihr Maximum erreicht. Bemerkenswerth ist indess, dass es scheinen will, als ob dieses Moment keinen wesentlichen Einfluss auf die Grösse des endlichen Maximums der Pause hätte. Ob der Verlauf der Curven übrigens ein Ausdruck für eine allgemeingültige Thatsache, oder nur individuell für mich ist, lässt sich natürlich noch nicht mit Gewissheit entscheiden.

Um diese Untersuchung zu completiren, machte ich dann eine völlig gleichartige Versuchsreihe mit einer Gasmischung, deren Sauerstoffgehalt wesentlich niedriger als der der atmosphärischen Luft war. Ich mischte gewöhnliche Luft und Kohlensäure in solchen Mengen, dass die Mischung ungefähr 10 Proc. Sauerstoff enthielt, d. h. ungefähr die Hälfte des Sauerstoffgehaltes in der äusseren Luft.

Dabei erhielt ich folgende Werthe, welche der grösseren Uebersichtlichkeit wegen mit den bei den beiden vorhergehenden Versuchsreihen erhaltenen Werthen zusammengestellt sind.

Anzahl der tiefen Respirat.	Länge der Pause nach			Differenz 2—1	Differenz 1—3
	1. Athm. in gewöhnlicher Luft (21 Proc. O) Sec.	2. Athm. in sauerstoffreicher Luft (34 Proc. O) Sec.	3. Athm. in sauerstoffarmer Luft (10 Proc. O) Sec.	Sec.	Sec.
1	4	6	2	2	2
2	5·8	7	3	1·2	2·8
3	6·2	8	4	1·8	2·2
4	7	10	5	3	2
5	7·3	13	5	5·7	2·3
6	7·3	13	5·5	5·7	1·8
8	7·6	13·5	6	5·9	1·6
10	8	14	6	6	2
12	9	14	6	5	3
14	9·1	14	6·5	4·9	2·6
17	10·2	14·5	7	4·3	3·2
25	12·4	15	8	2·6	4·4
40	15·5	15·5	8	0	7·5

Die unterste Curve auf Fig. 5 giebt in graphischer Darstellung die Veränderungen wieder, welche die Länge der Pause bei diesen Versuchen erlitten hat. Es zeigt sich, dass diese Curve die ganze Zeit unter derjenigen liegt, welche bei den Versuchen in atmosphärischer Luft erhalten wurde, dass sie aber in ziemlich analoger Weise dem Verlauf der letzteren mit einer wenigstens anfänglich einigermassen constanten Differenz von ungefähr 2 Secunden folgt. Bei ungefähr 25 tiefen Inspirationen scheint die Curve ein Plateau zu bilden, welches bedeutend niedriger liegt als das vorige. Die maximale Länge der Pause war nämlich 8 Secunden, aber nicht mehr als ungefähr die Hälfte des höchsten erreichten Werthes bei der vorigen Versuchsreihe.

Die Abnahme des Sauerstoffgehaltes in der Luft, mit welcher die Lungen durch die tiefen Respirationen ventilirt werden, hat also einen ganz deutlichen Einfluss auf die Länge der nachfolgenden Athmungspause, sofern als diese Pause, welche bei tiefer Athmung in sauerstoffarmer Luft ebenso constant wie bei demselben Versuche in gewöhnlicher Luft hervortritt, doch stets im ersteren Falle wesentlich kürzer ist, als bei den sonst gleichartigen Verhältnissen im letzteren Falle.

Der wesentliche Unterschied in der Länge der Pause, welcher erhalten wird, wenn man in derselben Weise athmet, mit tiefen Respirationen das eine Mal in sauerstoffreicher, das andere Mal in gewöhnlicher Luft, und da also alle Umstände bei den Versuchen mit Ausnahme der Sauerstoffzufuhr gleichartig sind, scheint kräftig dafür zu sprechen, dass man wenigstens zum Theil, gewiss zu einem wesentlichen Theil, diese Pause als eine *Apnoea vera*, d. h. als abhängig von dem Einfluss der Blutgase auf das respiratorische Centrum auffassen muss. Dies schliesst indess nicht aus, dass auch andere Momente bezüglich der Entstehung und Länge der Pause eine Rolle spielen können. Weiter hinten will ich darauf zurückkommen.

Als ich mit den oben beschriebenen Versuchen beschäftigt war, lag mir natürlich der Gedanke nahe, zu untersuchen, wie ein Athemstillstand, der durch Einfluss des Willens bewirkt wurde, sich unter ähnlichen Umständen verhielte, oder mit anderen Worten, wie die Fähigkeit, den Athem zu halten, durch die verschiedene Anzahl vorheriger tiefer Respirationen in gewöhnlicher bezw. sauerstoffreicherer und sauerstoffärmerer Luft verändert würde. Wäre die Annahme richtig, dass die beschriebene Athmungspause zum grossen Theil eine Apnoe vera sei, so müsste natürlich jedes Moment, welches die Pause steigert, auch die Fähigkeit, den Athem zu halten, steigern. Eine Reihe von Versuchen in dieser Richtung müsste also in gewisser Beziehung eine

Controle für die Zuverlässigkeit der vorhergehenden Versuche abgeben.



Verschiedene Versuche hinsichtlich der Steigerung, die in der

Fig. 5. Länge der Pause nach der steigenden Anzahl tiefer Inspirationen in 1. gewöhnlicher Luft: mittlere Curve; 2. sauerstoffreicher (34 Proc. O) Luft: obere (unterbrochene) Curve; 3. sauerstoffarme (10 Proc. O) Luft: unterste (unterbrochene) Curve. Abscisse: Anzahl der tiefen Inspirationen. Ordinate: Secunden.

Fähigkeit, den Athem zu halten, durch eine vorhergehende, mehr oder weniger gründliche Lungenventilation erreicht wird, sind bereits früher gemacht worden. Czermak (3) führt (i. J. 1855) an, dass er nach einer tiefen Inspiration den Athem 30 bis 35 Secunden halten konnte, nach 10 bis 18 kam er hinauf bis zu $1^1/_2$ Minuten. Filehne (12), welcher (im Jahre 1879) ähnliche Versuche beschrieben hat, konnte nach gewöhnlicher ruhiger Respiration den Athem höchstens 15 Secunden halten, nach 3 bis 4 tiefen Inspirationen 35 Secunden, nach 20 Secunden langer forcirter Athmung hielt er 50 bis 55 Secunden aus, ohne zu athmen; über diese Grenze kam er nicht. Richet (25) berichtet, dass er nach gründlicher Ventilation der Lungen, ohne nennenswerthe Schwierigkeit, bis 2 Minuten 15 Secunden kam; mit äusserster Anstrengung hielt er 15 Sec. länger aus, d. h. bis zu $2^1/_2$ Minuten, wobei doch die letzten Secunden äusserst peinigend waren.

Eine Angabe des Unterschiedes in der Fähigkeit, den Athem zu halten, welche vorliegt, wenn man von der In- oder Exspirationsstellung des Brustkorbes, wie auch der Aenderung derselben Fähigkeit Respiration in Luftarten von verschiedener Zusammensetzung ausgeht, dürfte indess kaum existiren.

Einige Reihen von diesbezüglichen Versuchen habe ich theils an mir selbst, theils an einer Anzahl anderer Personen gemacht. Dabei habe ich beobachtet, dass die tiefen Athemzüge in ruhigem Rhythmus ausgeführt worden sind, dass sie kein Gefühl von Athemnoth hinterlassen haben. Bei einigen von diesen Versuchen bin ich von der Inspirationsstellung ausgegangen, d. h. ich habe begonnen, den Athem zu halten, während die Lungen durch eine kräftige Inspiration mit Luft gefüllt waren, und habe dann die Luft allmählich zwischen den Lippen herausströmen lassen, bei anderen dagegen bin ich von der Exspirationsstellung ausgegangen, d. h. ich habe erst begonnen, wenn der Thorax nach der tiefen Inspiration in normale Exspiration zurückgekehrt war.

Bei diesen wie bei den Apnoeversuchen wurden die Bewegungen des Brustkorbes auf früher angegebene Weise mit den Pneumographen registrirt und die Zeit mit der Secundenuhr aufgezeichnet. Hierdurch konnte ich theils die Zeit genau messen, in der es mir während der verschiedenen Versuche gelang, den Athem zu halten, theils, da jede Bewegung des Brustkorbes aufgezeichnet wurde, auch controliren, dass im Laufe des Versuches keine unbedeutende Inspiration unbewusst gemacht wurde.

Vor Beginn der eigentlichen Versuche bestimmte ich meine

Fähigkeit, den Athem zu halten, nach der gewöhnlichen ruhigen Respiration, und bekam als Resultat folgende Werthe:

in Exspirationsstellung:	in Inspirationsstellung:
30 Sec.	45 Sec.

Darnach bestimmte ich, wie diese Fähigkeit sich event. veränderte, wenn ich vor dem Athemhalten eine oder mehrere Respirationen machte.

Untenstehende Tabelle giebt an, wie viele Secunden ich nach mehreren oder wenigeren tiefen Inspirationen den Athem halten konnte:

Die Anzahl tiefer Respirationen	In Exspirationsstellung Sec.	In Inspirationsstellung Sec.
1	43·5	49·5
5	59	65·5
10	68	78·5
15	83	93
20	94·5	110
25	102	115
30	112	120
35	112	121
40	112	122
60	113	123

Wie hieraus mit Deutlickeit hervorgeht, erzielt man durch eine Anzahl vorhergehender Respirationen eine in wesentlich hohem Grade vermehrte Fähigkeit, den Athem zu halten.

Wie bedeutend dieser Zuschuss in der That ist, dürfte am leichtesten so zu veranschaulichen sein, dass man die bei den vorbereitenden Versuchen nach gewöhnlicher Athmung erhaltenen Werthe der Fähigkeit, in Ex- und Inspirationsstellung den Athem zu halten, bezw. 30 und 45 Secunden, mit den verschiedenen Werthen vergleicht, welche bei den letzteren Versuchen genommen wurden und in Procenten von den primären Werthen (30 und 45 Secunden) die Grösse der Vermehrung berechnet, welche für jeden der verschiedenen Versuche erreicht wurde.

Eine solche Berechnung ist in der nachstehenden Tabelle ausgeführt.

Der Zuschuss beträgt nach:

Anzahl tiefer Respirationen	In Exspirationsstellung Proc.	In Inspirationsstellung Proc.
1	45	10
5	96·6	49·1
10	126·6	74·4
15	176·6	106·1
20	215	144·4
25	240	155·5
30	273·6	166·6
35	273·6	168·8
40	273·6	171·1
60	273·6	183·3

Ein Blick z. B. auf die Verhältnisse bei den Versuchen in Exspirationsstellung zeigt, dass schon nach 5 tiefen Inspirationen die Fähigkeit, den Athem zu halten, fast verdoppelt ist, nach 20 mehr als verdreifacht und nach 30 nahezu vervierfacht ist, dass aber darnach keine nennenswerthe Vermehrung erfolgt. Auch in Inspirationsstellung ist die Zunahme nach 30 tiefen Inspirationen so gut wie zu Ende. Besonders bemerkenswerth ist, dass sowohl bei diesen, wie bei den früher genannten Apnoeversuchen die Verbesserung der Resultate bei ungefähr 30 tiefen Inspirationen aufzuhören scheint.

Wenn man die maximalen Werthe, die bei den oben erwähnten früheren Versuchen erhalten wurden, mit den höchsten Werthen vergleicht, die ich erhielt, zeigt es sich, dass meine Ziffer, 123 Secunden, die von Czermak und Filehne als höchste Grenzwerthe angeführten Procente bezw. 55 Secunden bei Weitem überschreitet, dagegen Richet's Maximum 150 Secunden nicht erreicht. Hieraus und aus dem, was weiter unten noch erwähnt wird, geht mit Deutlichkeit hervor, dass man hier mit Verhältnissen zu thun hat, die starken individuellen Variationen unterworfen sind.

Bei Versuchen wie den oben angeführten darf man natürlich nicht den grossen Einfluss übersehen, den die Uebung auf die Fähigkeit hat, den Athem zu halten. Dass indessen die grossartige Vermehrung, die in diesen Fällen erreicht wurde, nicht allein oder auch nur hauptsächlich von dem Einflusse der Uebung herrühren kann, dürfte klar sein. Uebrigens habe ich durch die Anordnung der Versuche mich bemüht, den Einfluss der Uebung wenn nicht vollständig zu eliminiren, so doch möglichst zu beschränken. Die Versuche sind mit ziemlich langen Zwischenräumen gemacht, und habe ich mich überdies mit einer möglichst geringen Anzahl Versuche begnügt, so

dass die angeführten Ziffern nicht Mittelwerthe einer Anzahl Versuche sind, sondern das Resultat eines einzigen von jeder Art.

Die nun beschriebenen Versuche wurden nachher in der Weise zu Ende geführt, dass ich zwei gleichartige Versuchsserien machte, die eine unter Anwendung von sauerstoffreicher (34 Proc. O) Luft, die andere mit sauerstoffarmer (10 Proc. O). Die Resultate dieser Versuche waren folgende (die Werthe von der vorhergehenden Versuchsserie werden des Vergleiches wegen wiederholt):

Anzahl tiefer Respirat.	In gewöhnlicher Luft (21 Proc. O)		In sauerstoffr. Luft (34 Proc. O)		In sauerstoffarmer Luft (10 Proc. O)	
	Exsp.-Stell. Sec.	Insp.-Stell. Sec.	Exsp.-Stell. Sec.	Insp.-Stell. Sec.	Exsp.-Stell. Sec.	Insp.-Stell. Sec.
1	43·5	49·5	46·5	60	30	42
5	59	65·5	62	81·5	39	48
10	68	78·5	83	100	42	55
15	84	93	100	114	45	58
20	94·5	110	—	—	—	—
25	102	115	115	126	49	60
30	112	120	—	—	—	—
35	112	121	—	—	—	—
40	112	122	125	130	51	62
60	113	123	—	—	—	—

Dass der Sauerstoffgehalt in der durch tiefe Athemzüge inspirirten Luft also einen wesentlichen Einfluss auf die Grösse der Zunahme hat, welche die Fähigkeit, den Athem zu halten, durch eine vorhergehende Lungenventilation erhielt, und dass dieser Einfluss analog der Einwirkung ist, welche der Sauerstoffgehalt in der Luft ebenfalls auf die Grösse der Pause ausübte, die den tiefen Respirationen folgte, dürfte durch diese Ziffern klar bewiesen worden sein.

Um den Einfluss des vermehrten oder verminderten Sauerstoffgehaltes deutlicher zu veranschaulichen, theilen wir hier wie bei der vorigen Versuchsreihe eine Berechnung des Verhältnisses von den Zunahmen zu den ursprünglichen Werthen, 30 Secunden in Exspirationsstellung und 45 Secunden in Inspirationsstellung, ausgedrückt in Procenten, von den letztgenannten mit (s. Tabelle nächste Seite).

Die Resultate der nun beschriebenen drei Versuchsreihen habe ich auch im Bilde zu veranschaulichen gesucht, zu welchem Zwecke die Curven in Fig. 6 gemacht worden sind. Diese dürften keiner weiteren Erklärung benöthigen. Nach 30 tiefen Inspirationen hört das Steigen der Curven so gut wie ganz auf, doch verbleibt eine kleine

Anzahl tiefer Respirat.	In gewöhnlicher Luft (21 Proc. O)		In sauerstoffr. Luft (34 Proc. O)		In sauerstoffarmer Luft (10 Proc. O)	
	Exsp.-Stell. Proc.	Insp -Stell. Proc.	Exsp.-Stell. Proc.	Insp.-Stell. Proc.	Exsp.-Stell. Proc.	Insp.-Stell. Proc.
1	45	10	55	33·3	0	−6·6
5	96·6	49·1	106·6	81·1	30	6·6
10	126·6	74·4	176·6	111·1	40	22·2
15	176·6	106·6	233·3	153·3	50	28·8
25	240	155·5	283·3	180	03·3	33·3
40	273·6	171·1	316·6	188·8	70	37·7

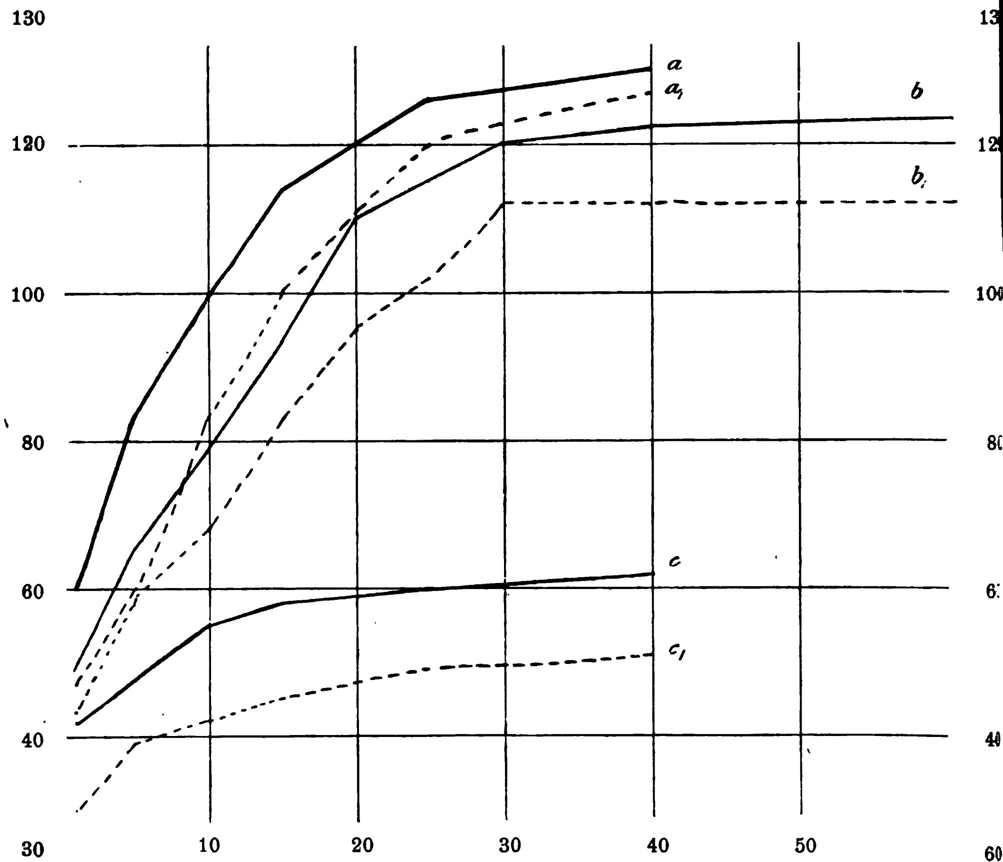


Fig. 6. Fähigkeit, den Athem zu halten, nach tiefer Inspiration. 1. In gewöhnlicher Luft: in Inspirationsstellung Curve *b;* in Exspirationsstellung Curve b_1; 2. in sauerstoffreicher (34 Proc. O) Luft: in Inspirationsstellung Curve *a*, in Exspirationsstellung Curve a_1; in sauerstoffarmer (10 Proc. O) Luft: in Inspirationsstellung Curve *c*, in Exspirationsstellung Curve c_1. Abscisse: Anzahl tiefer Insp. Ordinate: Zeit in Secunden.

Tendenz zur Hebung, was indessen von dem Einflusse der Uebung abhängen kann. Bei den Apnoeversuchen dagegen konnte diese sich natürlich nicht geltend machen, sondern die Curve nahm schliesslich ein vollkommen constantes Niveau ein.

Diese Untersuchung hinsichtlich der Fähigkeit, den Athem zu halten, dürfte also mit ziemlicher Sicherheit darlegen, dass die genannte Fähigkeit ganz deutlich zunimmt durch alle Momente, welche geeignet sind, die Sauerstoffaufnahme des Blutes in den Lungen zu erleichtern oder zu vermehren. Die tiefen Inspirationen, welche theils eine bedeutend vergrösserte Respirationsfläche, theils eine für den Gasaustausch vermehrte disponible Luftmenge beschaffen, eine Luftmischung, deren Sauerstoffgehalt wesentlich den der normalen atmosphärischen Luft übersteigt, sind natürlich Ursachen, welche kräftig in eben angeführter Richtung wirken. Ebenfalls muss die Erklärung von dem constant auftretenden Verhältniss, dass man bessere Resultate erzielt, wenn man von der In- als von der Exspirationsstellung ausgeht, in der gesteigerten Fähigkeit, den Sauerstoff der Luft aufzunehmen, welchen das Blut in den Lungencapillaren durch die Zurückhaltung einer grösseren Luftquantität erhält, gesucht werden. Bei einer Versuchsreihe dagegen, wo der Sauerstoffgehalt in der inspirirten Luft bedeutend geringer ist als in der normalen Luft, sinkt diese Fähigkeit in auffallender Weise. Diese Verhältnisse scheinen deutlich dafür zu sprechen, dass wirklich eine grössere Sauerstoffquantität als in gewöhnlichen Fällen im Blute gebunden ist, welches dadurch in Stand gesetzt worden ist, den Sauerstoffbedarf des Körpers für eine längere Zeit zu decken.

Ebenso kräftig wie die früher angeführten Apnoeversuche und in guter Uebereinstimmung mit diesen sprechen also diese Versuche dafür, dass der Athmungsstillstand, der bei den erstgenannten Versuchen eintrat, wenigstens theilweise als eine *Apnoea vera* aufgefasst werden muss.

Es ist leicht einzusehen, dass der Process, welcher stattfindet, wenn man den Athem so lange als möglich zurückhält, von ziemlich complicirter Natur ist. Zu demselben gehört natürlich ein weit über die Grenze der gewöhnlichen Verhältnisse getriebenes Ausnutzen der Sauerstoffanlage in Blut und Geweben, was durch einen rein psychischen Process möglich wird, nämlich durch ein Hemmen oder Unterdrücken der respiratorischen Impulse, welche sich natürlich weit eher einstellen, als der Versuch des Sauerstoffvorrathes eine Erstickungsgefahr mitbringt.

Es dürfte nicht unwahrscheinlich sein, dass der Einfluss der Uebung hier gerade darin liegt, dass die Fähigkeit, die Athmungsimpulse zu

unterdrücken, vermehrt wird. Dass dagegen eine Anzahl tiefer Inspirationen in gewöhnlicher oder sauerstoffreicherer Luft einen Einfluss auf dies Hemmungsvermögen sollte ausüben können, ist wohl nicht wahrscheinlich, sondern die bedeutende Steigerung der Fähigkeit, den Athem zu halten, welche unleugbar die Folge von solchen ist, hat wahrscheinlich ihre Ursache in der durch sie veranlassten Zunahme des Sauerstoffvorrathes im Blute. Je besser ventilirt und mit Sauerstoff versehen die Gewebe sind, desto länger muss es dauern, bis das Centrum zu unwiderstehlichen Respirationsimpulsen gereizt wird. Desto länger aber müssen auch die reflexhemmenden Apparate, welche ebenfalls für ihre Functionen vom Sauerstoffvorrathe abhängig sein müssen, dienstbar sein können. Man kann also meinen, dass die bessere Ventilation indirect dem Hemmungsprocesse selbst zu Gute kommt.

Neben dem rein theoretischen Interesse für das Verständniss der Entstehung der Apnoepause müsste diese Möglichkeit, die Befähigung, den Athem zu halten, in hohem Grade zu erhöhen, eine wichtige praktische Bedeutung erhalten können. Bei vielen Gelegenheiten, z. B. wenn es gilt, durch Staub oder Rauch (bei Feuersbrünsten u. s. w.) zu gehen, und vor Allem beim Tauchen dürfte dieser Umstand von Nutzen sein können.

Es will scheinen, als ob Taucher im Allgemeinen wenig wüssten von der Bedeutung für die Fähigkeit, den Athem zu halten, die in einer vorhergehenden, mehr oder weniger pünktlichen Lungenventilation liegt, und sich deshalb darauf beschränkten, mit Hülfe der Uebung die Möglichkeit, den Athem zu halten, zu erweitern, welche nach gewöhnlicher ruhiger Athmung oder im besten Falle nach einem oder einigen tiefen Athemzügen sich vorfindet. Es ist indess leicht einzusehen, dass eine Combination von Uebung mit nahezu gründlicher Lungenventilation vor jedem Versuche zu Resultaten führen muss, welche nicht unwesentlich diejenigen übersteigen, die jetzt im Allgemeinen erreicht werden.

Wie bereits vorher angedeutet, sind natürlich die individuellen Variationen auf diesem Gebiete sehr gross. Dass aber dennoch der Zuschuss in der Befähigung, den Athem zu halten, der durch das beschriebene Verfahren gewonnen wird, auffallend gross ist, dürfte aus einer Serie von Versuchen hervorgehen, die 8 Laboranten in dem hiesigen physiologischen Institut ausführten. Diese Versuche wurden in ganz derselben Weise wie die von mir oben beschriebenen angeordnet, obgleich weniger detaillirt ausgeführt.

Folgende Tabelle zeigt, wie viele Secunden die einzelnen Versuchspersonen den Athem halten konnten theils nach gewöhnlicher Athmung,

theils nach 1, 10 und 20 vorhergehenden tiefen Athemzügen, sowohl in In- wie in Exspirationsstellung.

Versuchs-personen	Nach gewöhnl. Respiration		Nach 1 tiefen Inspiration		Nach 10 tiefen Inspirationen		Nach 20 tiefen Inspirationen	
	Exsp.-St. Sec.	Insp.-St. Sec.	Exsp.-St. Sec.	Insp.-St Sec.	Exsp.-St. Sec.	Insp.-St. Sec.	Exsp.-St. Sec.	Insp.-St. Sec.
1. (E. S.	22·5	38	56	78	80	106	88	162
2. (K. F. H.)	25	38	42	52	60	75	70	92
3. (A. P.)	27	32	32	37	68	75	68	93
4. (K. H. G.)	28·2	33·9	32·2	66	60	88	104	97
5. (E. W.)	37·3	59·7	77·2	106	80	168	87	163
6. (G. L.)	37·9	72	51·2	72	94	120	121	185
7. (C. S.)	46·2	58·1	59	93	92	143	100	184
8. (C. W.)	71	153	103	141	135	197	158	222

(Hier folgt Fig. 7 S. 190.)

Zur Verdeutlichung dieser Werthe wird hier auch eine Berechnung von der Grösse des Zuschusses, ausgedrückt in Procenten, von den Werthen, welche bei den einleitenden Versuchen, den Athem ohne vorhergehenden tiefen Athemzug zu halten, erhalten wurden.

Nr. der Versuchs-person	Nach 10 tiefen Inspirationen		Nach 20 tiefen Inspirationen	
	Exspirat.-Stell. Proc.	Inspirat.-Stell. Proc.	Exspirat.-Stell. Proc.	Inspirat.-Stell. Proc.
1	255·5	178·9	291·1	326·3
2	120	89·4	180	142·1
3	151·8	134·3	151·8	190·6
4	112·7	165·4	263·2	186·1
5	114·4	173	133·2	173
6	148	66·6	219·2	159·6
7	99·1	146·1	112·2	211·5
8	90·1	60·1	122·5	80·5

Noch anschaulicher dürfte indess die Grösse der Zunahme aus der graphischen Darstellung der Thatsache hervorgehen, wie wir sie in Fig. 7 sehen. Für jede der 8 Versuchspersonen (durch die Ziffern I bis VIII bezeichnet) sind 4 Striche gezogen, von denen zwei die Fähigkeit, nach normaler Athmung („N") den Athem zu halten, die zwei anderen dieselbe Fähigkeit nach 20 tiefen Inspirationen („20")

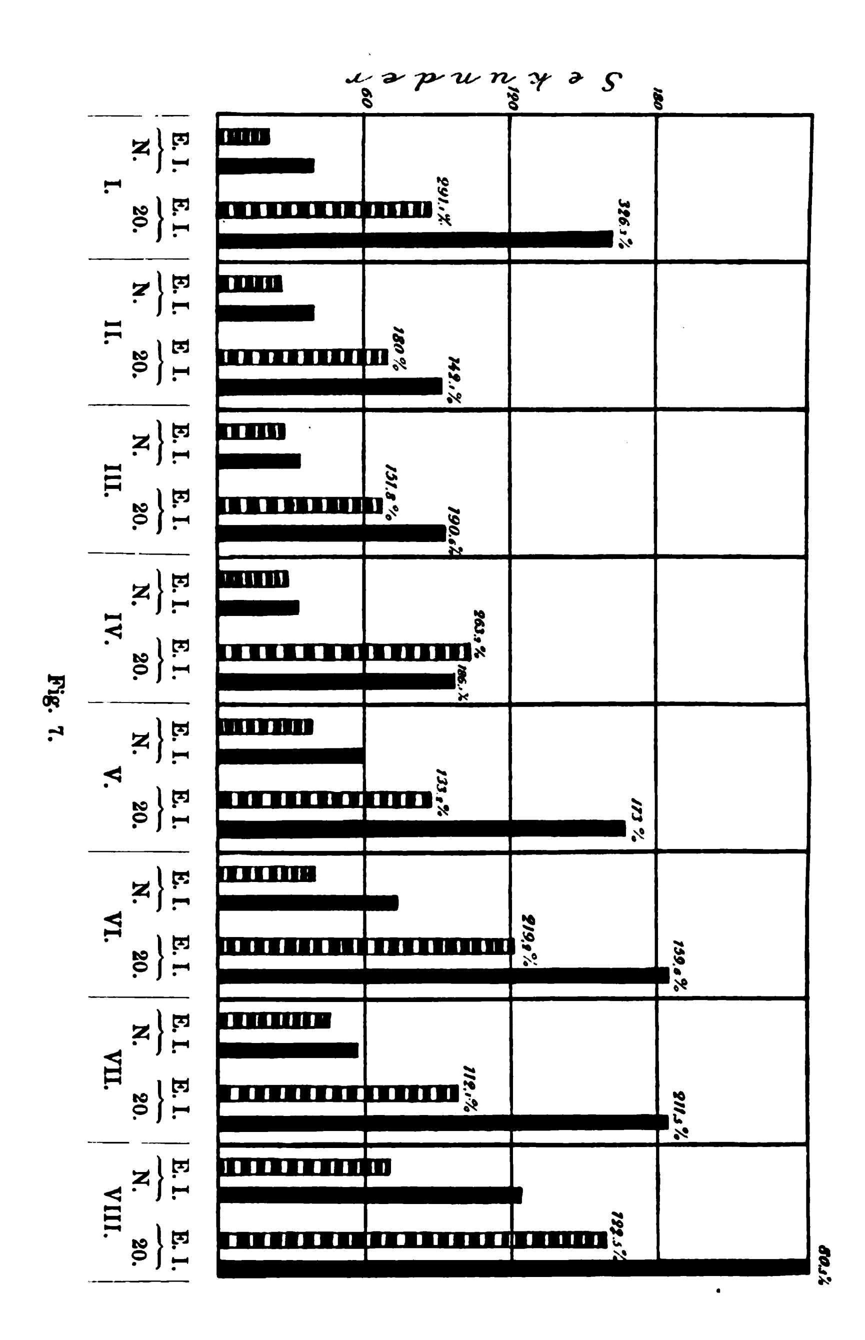


Fig. 7.

repräsentiren. Oberhalb der letzteren ist das Zunahmeprocent im Verhältniss zu den ersteren angegeben. Die unterbrochenen Striche be-

zeichnen die Versuche in Exspirationsstellung, die ausgefüllten die in Inspirationsstellung.

Eine Prüfung der oben angeführten Ziffern wie auch der Fig. 7 giebt an die Hand, theils dass grosse individuelle Schwankungen sich sowohl hinsichtlich der Fähigkeit geltend machen, den Athem zu halten nach gewöhnlicher normaler Respiration, wie auch in Bezug auf die Grösse der Zunahme, welche durch vorangehende Lungenventilation erhalten wird, theils auch, dass diese Zunahme in der Fähigkeit, den Athem zu halten, welche bei sämmtlichen Versuchspersonen erzielt wurde, ausserordentlich bedeutend gewesen ist. Zu bemerken ist, dass die Versuchsperson C. W., welche vorher ein geübter Taucher war, dennoch einen erheblichen Zuschuss erreichte. Nach 10 tiefen Respirationen z. B. hat die Zunahme zwischen etwa 100 Proc. und über 250 Proc. geschwankt, nach 20 kräftigen Athemzügen ist der Zuschuss über 300 Proc. der ursprünglichen Fähigkeit gestiegen.

Dass eine allgemeine Kenntniss dieses Sachverhaltes praktische Bedeutung erhalten könnte, liegt klar am Tage. So viel ich erfahren habe, ist die längste Zeit, die ein Taucher von Fach sich unter Wasser halten kann, 4 Min. 46$^1/_5$ Sec., ein Kunststück, welches von einem „Professor“ Enoch ausgeführt worden sein soll. Richet (25) berichtet von einem Capitän James, welcher 4 Min. 14 Sec. unter Wasser blieb, und giebt auch an, dass kein Taucher den Preis von 5000 Francs hat erobern können, welcher in London demjenigen ausgesetzt war, welcher 5 Minuten unter Wasser bleiben könnte.

Da man aus vorstehenden Ziffern ersieht, dass mehrere der Versuchspersonen nach 20 tiefen Inspirationen über 3 Min. gekommen sind, und zwar bei ihren ersten Versuchen, also ohne dass die Uebung das Resultat hat beeinflussen können, erscheint es nicht unmöglich, dass eine systematische Benutzung von gründlicher Lungenventilation vereint mit Uebung höhere Werthe als diese soeben als bisher unübertroffen bezeichneten ergeben könnte.

Die eigentliche Bedeutung des Angeführten liegt indess nicht darin, dass der Weltrecord im Tauchen nach der Zeit möglicher Weise um einige Secunden erhöht werden könnte, sondern in der Leichtigkeit, mit welcher gewöhnliche Schwimmer und Taucher, die selten länger als $^1/_2$ bis 1 Min. unter Wasser aushalten können, ohne Schwierigkeit ihre Fähigkeit in dieser Hinsicht wesentlich erhöhen können.

Es ist indess nicht gut, diese Versuche mit einer allzu grossen Anzahl tiefer Inspirationen auszuführen. Schon bei etwa 20 solchen

stellen sich, individuell früher oder später, verschiedene Unannehmlichkeiten ein, wie Schwindel, Pochen in den Schläfen, flimmernde Gesichtssensationen u. s. w. Eine allgemeine Regel aufzustellen über die geeignetste Anzahl tiefer Inspirationen zur Erreichung des, praktisch genommen, grössten Gewinnes, lässt sich kaum thun, was auch aus den grossen individuellen Schwankungen hervorgeht, wie sie die Tabellen S. 319 zeigen. Am geeignetsten dürfte es sein, mit der Uhr in der Hand durch einige einfache Versuche die Anzahl tiefer Respirationen zu erforschen, welche man ohne Nachtheil ausführen kann und die nach der Berechnung die grösste verwendbare Zunahme geben. Auch wenn man sich auf 10 bis 15 tiefe Athemzüge beschränkt, welche unter gewöhnlichen Verhältnissen keine der oben erwähnten Unannehmlichkeiten im Gefolge haben, wird die Zunahme auf jeden Fall höchst bedeutend, da dieselbe bei den oben beschriebenen Versuchen nach 10 Athemzügen zwischen 100 und 250 Procent der ursprünglichen Fähigkeit variirte.

Es ist von Wichtigkeit, dass die tiefen Athemzüge in ruhigem, normalem Rhythmus ausgeführt werden, so dass sie kein belästigendes Gefühl von Athemlosigkeit verursachen. Auch darf nicht vergessen werden, dass die Ausführung der tiefen Respirationen eine gewisse Zeit in Anspruch nimmt, und dass es Zufälle geben kann, z. B. wenn es gilt, einen Ertrinkenden zu retten, wo man dadurch einige der werthvollsten Secunden verlieren kann. Dass indess der Gewinn grösser ist als die Zeit, welche die tiefen Athemzüge verlangen, kann man aus der Tabelle S. 319 ersehen. Wenn man die Zeit, welche 10 tiefe Respirationen erheischen, zu ungefähr 40 Secunden berechnet, findet man, dass der Unterschied zwischen dem Werthe für beispielsweise die Inspirationsstellung nach gewöhnlicher Athmung und nach zehn tiefen Inspirationen bei den Meisten höher steigt als 40 Secunden. Nach einiger Uebung dürfte mit aller Wahrscheinlichkeit der Gewinn bedeutend grösser werden.

Es dürfte zu erwähnen sein, dass ich mich, wie die acht anderen Versuchspersonen, bei diesen Versuchen vollkommen unbeweglich gehalten habe, und dass jede Bewegung in Folge des dadurch verursachten grösseren Sauerstoffverbrauches eine Beschränkung in der Grösse des Zuschusses, der durch die Lungenventilation erworben wird, im Gefolge hat.

Nachdem ich über diese Versuche und deren Resultate wegen der praktischen Bedeutung, die sie vielleicht haben können, etwas ausführlicher berichtet habe, gehe ich zum Bericht über die passive Respirationspause und deren Erklärung über.

Bereits vorher ist betont worden, dass diese Pause zum Theil als eine *Apnoea vera* aufzufassen sei.

Wie gleichfalls oben angedeutet worden, ist es gelungen, bei Thieren durch Einblasen von verhältnissmässig sauerstoffarmen Gasmischungen Apnoe hervorzurufen. Head (21) hat sogar beim Kaninchen durch Einblasen von reinem Wasserstoffgas Apnoe erhalten, obgleich diese nur von kurzer Dauer war.

Die Ursache dieser so erzeugten Apnoe ist vor Allem in der besonders von den pulmonalen Vagusfäden ausgegangenen reflectorischen Hemmung gesucht worden.

Meine Versuchsanordnung erlaubte mir natürlich nicht, zu studiren, welchen Einfluss besonders der N. vagus oder Nerven überhaupt auf die Entstehung und Dauer der Pause haben. Dagegen vermochte ich mit Leichtigkeit zu erforschen, ob ich mit Benutzung von sauerstoffarmer Luft oder sogar Wasserstoff bei mir nach tiefen Inspirationen eine Pause erzeugen konnte.

Aus den oben beschriebenen Versuchen ist hervorgegangen, dass ich nach tiefen Athemzügen in der Luft, welche nur 10 Proc. Sauerstoff enthielt, constant eine kurze Apnoe erhielt. Ich setzte diese Versuche mit immer sauerstoffärmeren Luftmischungen fort und erhielt bei allen eine kurze Pause in Exspirationsstellung unmittelbar nach den tiefen Respirationen.

Ich machte zuletzt eine Anzahl Versuche mit tiefen Inspirationen in reinem, ungemischtem Wasserstoffgas. Ich konnte bis vier derartige Versuche machen, ohne Symptome von Athemnoth zu bemerken, welche dagegen eintraten, sobald ich diese Zahl überschritt.

Bei diesen Versuchen erhielt ich ebenfalls constant eine kurze, $1^1/_2$ bis 2 Secunden lange Pause nach der letzten Exspiration, bevor die Athmung in Luft zu ihrer normalen Form zurückging. Eine Variation der Länge liess sich bei dieser Pause nicht nachweisen. Verglichen mit der Länge der Pause, welche nach einer tiefen Inspiration in gewöhnlicher Luft erhalten wurde, beträgt die Länge derselben also nur ungefähr die Hälfte der letzteren.

Hieraus scheint hervorzugehen, als ob jegliche tiefe, kräftige Inspiration in irgend einer Weise stets einen Athmungsstillstand in Exspirationsstellung verursacht, abgesehen von der Ventilation, und wenn dies der Fall ist, muss natürlich die Pause nach tiefen Athemzügen zum Theil auch als eine *Apnoea spuria* aufgefasst werden.

Es ist interessant zu beobachten, dass ein gewisser Zusammenhang zwischen der Ausführung von kräftigen, tiefen Respirationsbewegungen

und der Möglichkeit, überhaupt Apnoe hervorrufen zu können, zu bestehen scheint.

Zahlreiche Versuche von Fredericq (22, 23, 24), Speck und Dohmen[1] u. A. thun dar, dass Thiere, welche mit normaler Amplitude in sehr sauerstoffreicher Luft athmen, d. h. in reinem Sauerstoffgas, keine Apnoe zeigen, nur einen verlangsamten Respirationsrhythmus. Dagegen — sobald ein kräftigerer Inspirationsimpuls ausgesandt wird, so dass eine stärkere Ausdehnung der Lungen eintritt, ist es möglich, auch mit sehr sauerstoffarmer Luft, ja sogar mit reinem Wasserstoffgas Apnoe zu erzeugen. Dies scheint darauf zu deuten, dass gerade die Ausdehnung der Lungen oder vielleicht der forcirte Respirationsimpuls Bedingung für die Möglichkeit wäre, die erwähnte Athmungspause hervorzurufen.

Möglicher Weise könnte man sich den Verlauf hierbei so denken, dass entweder die reflectorische Hemmungswirkung von centripetal führenden Nerven, hervorgerufen durch die Ausdehnung der Lungen, wie Gad (14) angenommen, oder auch die forcirten Respirationsimpulse, oder vielleicht beide Momente zusammen eine verminderte Reizbarkeit des respiratorischen Centrums bewirken; in welchem Falle man sich ja denken könnte, dass auch eine unbedeutende Vermehrung des Sauerstoffgehaltes in dem arteriellen Blute hinreichend wäre, eine *Apnoea vera* als Fortsetzung der einleitenden *Apnoea spuria* zu erzeugen.

Wie es sich nun damit auch verhalten mag, so dürfte man in jedem Falle auf Grund der oben angeführten Erfahrungen zu der Behauptung berechtigt sein, dass ein Moment der *Apnoea spuria* zu dem passiven Athmungsstillstande nach tiefen Inspirationen gehört.

Die von Hoppe-Seyler ausgesprochene Ansicht, dass die Apnoe ausschliesslich durch Ermüdung des Athmungsapparates hervorgerufen wird, welche Ansicht von Rosenthal, Filehne u. A. stark bekämpft worden ist, scheint später keine Vorkämpfer mehr gefunden zu haben, und kann offenbar auch nicht mehr aufrecht erhalten werden. Es lässt sich indess nicht leugnen, dass es a priori sehr wahrscheinlich erscheint, dass es sich denken lässt, dass Ermüdung bei solchen Versuchen wie den oben beschriebenen einen gewissen Einfluss ausüben kann.

Da man weiss, welchen bedeutenden Einfluss Müdigkeit und Ermüdung auf alle Gebiete der Thätigkeit des Organismus ausüben, und

[1] Speck und Dohmen, cit. von Fredericq in (23).



wenn man bedenkt, dass eine grössere Anzahl Respirationsbewegungen von so ungewöhnlicher Amplitude wie diejenigen, welche bei den oben beschriebenen Versuchen ausgeführt worden sind, eine recht grosse und aussergewöhnliche Anstrengung für den Athmungsapparat bedeuten muss, so müsste man es sehr befremdlich finden, wenn man nicht besonders nach einer grösseren Zahl tiefer, kräftiger Respirationen Wirkungen nachweisen könnte, deren Ursache in der Müdigkeit des Athmungsapparates: des Centrums oder der Musculatur zu suchen wäre.

Um eine Vorstellung von dem Einflusse der Müdigkeit hierbei zu bekommen, habe ich einen Versuch gemacht, der indess kein directes Resultat ergab. Ich liess den ganzen Thorax mit einem starren Gipscorset umgeben, welches Athembewegungen von normaler Amplitude zuliess, den Brustkorb aber daran verhinderte, sich mehr auszudehnen. Es war nun meine Absicht, eine Anzahl forcirter Respirationsimpulse anzuwenden, deren einziger Effect der werden sollte, dass sie das Centrum ermüdeten, während die Sauerstoffzufuhr nicht vermehrt werden sollte, noch die Lungen in erheblichem Grade sollten gespannt werden können. Es zeigte sich indess, dass das Ungewöhnliche in der Situation es unmöglich machte, Apnoeversuche mit nöthiger Passivität vorzunehmen. Dazu wäre es nöthig gewesen, dass ich das Gipscorset eine längere Zeit getragen hätte, so dass das Gefühl dabei eine Gewohnheit geworden wäre und also keine specielle Aufmerksamkeit in Anspruch genommen hätte.

Es erscheint mir indessen höchst wahrscheinlich, dass die Müdigkeit hierbei wirklich einen gewissen Einfluss ausübt. Dafür spricht der Umstand, dass ich stets nach einer grösseren Anzahl, mindestens 20 tiefen Athemzügen, ein specifisches Gefühl von Müdigkeit gehabt habe. Die folgenden Respirationen haben gewissermaassen grössere Anstrengung gekostet.

Aus den Untersuchungen, über welche ich in Obigem berichtet habe, scheint also hervorzugehen, dass die respiratorische Pause nach tiefen Inspirationen als eine Combination von Apnoea vera und Apnoea spuria zu betrachten ist. Sie ist zwar zum grossen Theil eine Apnoea vera, da sie offenbar ihrer Länge nach im höchsten Grade von dem Sauerstoffgehalte der eingeathmeten Luft abhängig ist; sie wird aber entschieden durch eine Apnoea spuria eingeleitet, beruhend auf Reflex oder Müdigkeit des Centrums, da auch eine tiefe Einathmung in reinem Wasserstoffgas eine, obschon kurze Pause erzeugt; und es ist wahrscheinlich, dass nach einer grösseren Anzahl tiefer Respirationen

die Müdigkeit dazu beiträgt, die Länge der Pause zu vermehren. In solchem Falle ist auch dieser Antheil der Pause als eine Apnoea spuria zu betrachten.

Litteratur.

1. Rosenthal, J., *Die Athembewegungen und ihre Beziehungen zum Nervus vagus.* Berlin 1862.

2. Thiry, L., Des causes des mouvements respiratoires et de la dyspnée. *Rec. des travaux de la sociét. médic. allem.* Paris 1865. Ref. von Rosenthal im *Centralbl. f. die med. Wissensch.* 1865. S. 611.

3. Czermak, J., Ein Experiment über die Beziehungen des Gaswechsels in den Lungen zum Athmungsbedürfnisse beim Menschen. *Centralbl. für die med. Wissensch.* 1866. Bd. IV. S. 81.

4. Hering, Paul, Einige Untersuchungen über die Zusammensetzung der Blutgase während der Apnoe. *Diss.* Dorpat 1867.

5. Pflüger, E., Ueber die Ursache der Athembewegungen, sowie der Dyspnoë und Apnoë. *Arch. f. d. ges. Physiol.* 1868. Bd. I. S. 100.

6. Brown-Séquard, in *Bull. de la Soc. de Biol.* 1871. S. 135 u. 156 (cit. von Fredericq (23) und im *Arch. de Physiol. normale et pathologique.* 1872. Bd. IV. S. 202.

7. Ewald, Aug., Zur Kenntniss der Apnoe. *Arch. f. d. ges. Physiol.* 1873. Bd. VII. S. 575.

8. Filehne, W., Ueber Apnoë und die Wirkung eines energischen Kohlensäurestromes auf die Schleimhäute des Respirationsapparates und über den Einfluss beider auf verschiedene Krampfformen. *Arch. f. Anat. und Physiol.* 1873. Physiologische Abtheilung. S. 361.

9. Rosenbach, O., Zur Physiologie des Nervus vagus. *Centralbl. f. d. med. Wissensch.* 1877. S. 97.

10. Häfner, G., Ueber die Bestimmung des Hämoglobin- und Sauerstoffgehaltes im Blute. *Zeitschr. f. physiol. Chem.* 1879. Bd. III. S. 1.

11. Hoppe-Seyler, F., Ueber die Ursache der Athembewegungen. Ebendas. S. 105.

12. Filehne, W., Ein Beitrag zur Physiologie der Athmung und der Vasomotion. Nachtrag. *Arch. f. Anat. u. Physiol.* 1879. Physiol. Abtheil.

13. Rosenthal, J., Die Physiologie der Athembewegungen und der Innervation derselben. Hermann's *Handbuch*, 1880. IV. S. 163.

14. Gad, J., Ueber Apnoë. Würzburg 1880.

15. Bieletsky, N. F., Zur Frage über die Ursache der Apnoe. *Biol. Centralbl.* 1882.

16. Knoll, Ph., Athmung bei Erregung der Vaguszweige. *Wien. Akad. Sitzungsber.* 1884. LXXXIII. 3.

17. Miescher-Rüsch, F., Bemerkungen zur Lehre von den Athembewegungen. *Arch. f. Anat. u. Physiol.* 1885. Physiol. Abth.; wie F. Holmgren's Referat in *Upsala Läkaref. förhandl.* 1885. Bd. XXI. S. 184.

18. Mosso, Angelo, Periodische Athmung und Luxusathmung. *Arch. f. Anat. u. Physiol.* 1886. Physiol. Abth.

19. Marckwall, Max, Die Athembewegungen und deren Innervation beim Kaninchen. *Zeitschr. f. Biol.* 1887. Bd. XXIII.

20. Franck, C., und Langendorff, O., Ueber die automatische Thätigkeit des Athemcentrums bei Säugethieren. *Arch. f. Anat. u. Physiol.* 1888. Physiol. Abth.

21. Head, On the regulation of respiration. *Journal of Physiology.* 1889.

22. Fredericq, Léon, Ueber die Tension des Sauerstoffes im arteriellen Peptonblut bei Erhöhung derselben in der eingeathmeten Luft. *Centralbl. f. Physiol.* 1894. Bd. VIII. S. 34.

23. Derselbe, Apnée. *Dictionnaire de Physiologie* par Ch. Richet 1895. T. I. S. 630.

24. Derselbe, L'augmentation de la tension de l'oxygène peut-elle produire l'apnée? *Arch. de Biol.* 1895. XIV. S. 119.

25. Richet, Ch., Asphyxie. *Dictionnaire de Physiol.* par Ch. Richet 1895. T. I. S. 728.

Untersuchungen über den Einfluss des Tetanus auf die absolute Festigkeit des Muskels.[1]

Von

Dr. Karl Petrén.

(Aus dem physiologischen Laboratorium der Universität Lund.)

Betreffs der hier angegebenen Frage liegen, so viel ich weiss, nicht viele Untersuchungen vor. Wundt[2] hat früher dieser Frage seine Aufmerksamkeit gewidmet. Er hat seine Untersuchungen in der Weise vorgenommen, dass er die Muskeln durch Gewichte belastet hat. „Nach jeder Belastung wurde kurze Zeit zugewartet, und nachdem sich gezeigt hatte, dass der Muskel ruhend die Belastung noch trug", wurde er tetanisirt. Bei jedem neuen Versuche dieser Art wurde das Gewicht vermehrt, bis der Muskel zerrissen wurde. Dies trat, wie Wundt fand, immer während des ruhenden Zustandes des Muskels ein. Aus diesen Versuchen zieht er den Schluss, dass die Festigkeit („Cohäsion") des Muskels während des Tetanus nicht vermindert wird. Ob aber dieselbe dabei vermehrt wird, hat er nicht geprüft, nimmt jedoch an, dass dies nicht der Fall ist, sondern dass die Festigkeit des Muskels während des Tetanus sich nicht verändert.

In der vor einigen Jahren erschienenen Reihe von Abhandlungen von Blix[3] über die Länge und die Spannung des Muskels berührt dieser Autor auch die Frage nach der Zerreissung der Muskeln und erwähnt die Beobachtung, dass „ein in seiner natürlichen Länge festgehaltener Muskel beim Tetanisiren oft von den zusammenziehenden Kräften zerrissen wird".

---

[1] Der Redaction am 28. October 1901 zugegangen.

[2] Wundt, *Die Lehre von der Muskelbewegung.* Braunschweig 1858.

[3] Blix, Magnus, Die Länge und die Spannung des Muskels. *Dies. Arch.* Bd. III. S. 295. Bd. IV. S. 399 und Bd. V. S. 150.

In neuester Zeit haben Carvallo und Weiss[1] eine Untersuchung über die Festigkeit des ruhenden bezw. des tetanisirten Muskels mitgetheilt. Sie haben die zur Zerreissung des Muskels nöthige Kraft beim tetanisirten Muskel grösser gefunden als bei dem ruhenden, symmetrischen, und zwar gerade so viel grösser, als die „Contractionskraft" des betreffenden Muskels „auf einem geaichten isometrischen Myograph gemessen". Weiter fügen sie dazu die Bemerkung, dass die symmetrischen Muskeln in ruhendem Zustande identische Werthe („les mêmes chiffres") geben. Die Autoren beschreiben ihre Versuchsanordnung nicht näher, und besonders wird gar nicht erwähnt, wie die zur Zerreissung der Muskeln benutzte Kraft dargestellt worden ist.

Ich habe mir die Aufgabe gestellt, den Einfluss des Tetanus auf die absolute Festigkeit des Muskels zu prüfen. Bei dieser Untersuchung bin ich in folgender Weise vorgegangen. Das Muskelpräparat ist in dem von Blix in der citirten Arbeit beschriebenen Spannungschreiber aufgehängt worden. Die Spannung habe ich auf der Kymographtrommel registrirt.

Als Kraftquelle, um die zur Zerreissung des Muskels nöthige Spannung darzustellen, habe ich eine solche wählen wollen, welche eine bis zur Zerreissung gleichförmig wachsende Dehnung bewirken konnte. Verschiedene Versuche mit demselben Muskel, welche z. B. bei successiver Belastung des Muskels durch immer grössere Gewichte nöthig gewesen wären, habe ich vermeiden wollen. Es schien mir nämlich wahrscheinlich zu sein, dass die starke Belastung, welche man dabei mehrere Male anzuwenden nöthig hätte, gleich wie sie die sonstigen Eigenschaften des Muskels verändert, auch einen anderen Festigkeitsgrad des Muskels bewirken würde.

Diese Annahme wurde auch durch meine spätere Erfahrung bestätigt. So fand ich z. B. einmal, als der erste Versuch misslungen war (wegen Zerreissung des Fadens), dass bei diesem Versuche eine höhere Spannung des Muskels erreicht worden war, als bei der sofort nachher vorgenommenen Zerreissung. Diese Beobachtung bestätigt meine ursprüngliche Annahme, dass man, um die Ergebnisse der verschiedenen Versuche mit einander vergleichen zu können, mit jedem Muskel nur eine Dehnung machen darf.

Weiter muss man fordern, dass die Dehnung des Muskels immer mit derselben Schnelligkeit erfolgt. Es dürfte nämlich zu erwarten sein, dass das Maass der bei Zerreissung des Muskels erreichten Span-

[1] C. Carvallo et G. Weiss, Résistance à la rupture des muscles à l'état de repos ou de contraction. *C. R. de la soc. de biologie.* 1899. S. 122.

nung von der Zeit abhängt, während welcher die spannende Kraft auf den Muskel einwirkt. Mit dieser Auffassung steht auch die Erfahrung von Carvallo und Weiss in Uebereinstimmung. Sie geben nämlich an, dass der Muskel eine Zeit lang, z. B. 4 bis 5 Secunden, dasselbe Gewicht erträgt, welches später die Zerreissung bewirkt. Ein Einfluss der Zeit, während welcher der Muskel vor der Zerreissung gedehnt wird, auf die gefundene Festigkeit des Muskels würde wohl am sichersten vermieden werden, wenn der Muskel möglichst schnell, einfach mit einem Rucke abgerissen würde. Diese Methode lässt sich jedoch nicht anwenden, weil Eigenschwingungen des Spannungsschreibers dabei notwendiger Weise aufgetreten wären, und folglich die Spannungscurve dadurch verändert worden wäre.

Man muss deshalb die Dehnung allmählich erfolgen lassen. Eine Kraftquelle, um die Muskeln zu zerreissen, welche die erwähnten Bedingungen gut erfüllte, glaube ich im elektrischen Motor gefunden zu haben, welcher sonst zum Kymograph benutzt wird. Ich habe denselben (natürlich ohne Trommel) mit der Axe in horizontaler Stellung benutzt. Das untere Ende des Muskelpräparates wurde mit einem Faden (Seide oder Kupfer) umbunden und der Faden an der mit einem Loche durchbohrten Axe befestigt. Als der Motor in Bewegung gesetzt wurde, wand sich der Faden um dessen Axe. Dabei wird der Muskel gedehnt, bis die Zerreissung eintritt und seine Spannung auf der Trommel des anderen Kymographs aufzeichnet.

Der Spannungsschreiber war auf einem verticalen Stativ befestigt. Weiter nach unten, an demselben Stativ, war ein an der unteren Seite mit einer rinnenförmigen Vertiefung versehener Arm befestigt, durch welchen die horizontale, sonst nach oben frei bewegliche Axe des Motors in ihrer Stellung festgehalten wurde. Die Aufstellung war eine solche, dass der Faden eine verticale Stellung einnahm. Durch diese Anordnung wurde erreicht, dass dieselbe Kraft, mit welcher der Faden durch das Muskelpräparat auf den Spannungsschreiber in der Richtung nach unten wirkte, durch die Befestigung des Fadens an der Axe und durch die Festhaltung dieser am erwähnten Arme, auf diesen in der Richtung nach oben wirkte. Auf diese Weise wurde vermieden, dass das verticale Stativ des Spannungsschreibers durch die Spannung des Fadens zur Seite gebogen wurde, welches eine falsche Registrirung der Spannung bewirkt hätte.

Mit dieser Versuchsanordnung wurde die Dehnung des Muskels in gleichförmiger Weise bewirkt, weil die Rotationsschnelligkeit des betreffenden Motors durch die zur Zerreissung der benutzten Muskeln erforderliche Arbeitsleistung nicht beeinflusst wurde. Bei dieser Anord-

nung war ich auch in der Lage, die Spannung des in der natürlichen Lage tetanisirten Muskels registriren zu können.

Als Präparat habe ich theils, dem Vorschlage von Fick nach, die beiden langen Adductoren (Gracilis und Semimembranosus; nur bei einigen wenigen, besonders grossen Thieren aber nur den Gracilis) der beiden Schenkel des Frosches, theils die Musc. gastrocnemii benutzt. Von jedem Frosche habe ich im Allgemeinen diese beiden Präparate angewendet, indem ich sowohl den gemeinschaftlichen Ansatz beider Adductoren am Becken, als die beiden Beinenden an den Knien und die unteren Ansätze der Gastrocnemii bewahrt habe. Zuerst ist der Versuch mit den Adductoren vorgenommen worden, indem das Becken am Spannungsschreiber befestigt wurde, nacher mit dem Gastrocnemius, dessen oberstes Ende mit einem Haken durch das Kniegelenk fixirt wurde.

Bei der in der geschilderten Weise ausgeführten Zerreissung der Muskeln beobachtete ich dieselbe Erscheinung, welche Blix in der citirten Arbeit erwähnt hat, nämlich dass „die Zerreissung nicht plötzlich von Statten geht, sondern mehr allmählich, indem erst nur eine oder einige Muskelfasern nachgeben und nachher mehrere". Nicht immer trat das Bersten der Muskelfasern mit derselben Gleichförmigkeit ein. Zuweilen wurde sogar beobachtet, dass erst ein Theil des Muskels zerrissen wurde, nachher aber die Spannung des rückständigen Theiles wieder etwas stieg, bis das Bersten auch hier anfing. In diesen Fällen zeigte die Spannungscurve eine oder einige wenige Zacken des ansteigenden Theiles nahe an der Spitze. Am öftesten aber bot die Curve solche Unebenheiten nicht dar.

Bei den Versuchen mit den Adductoren trat die Zerreissung immer im Muskelbauche ein, betreffs des Gastrocnemius aber geschah dies nicht mit derselben Regelmässigkeit. Zuweilen wurde nämlich die obere Insertion abgerissen, zuweilen und öfters die Achillessehne zerrissen. Im Allgemeinen aber trat die Zerreissung im Muskel selbst ein. Dabei folgen die fächerförmig ausgebreiteten Sehnenblätter der oberen bezw. der unteren Insertionssehne ganz der betreffenden Sehne, wodurch die Rissfläche des Muskels — in Uebereinstimmung mit dem Bau dieses Muskels — die Gestalt zweier, in sehr spitzem Winkel gegen einander verlaufender Flächen erhält.

Zuerst habe ich die Festigkeit der symmetrischen Muskeln in ruhendem Zustande geprüft. Dabei habe ich fast völlig ausnahmslos verschiedene Werthe rechts und links bekommen. Der Unterschied ist im Allgemeinen gar nicht unbedeutend gewesen, oftmals 10 bis 20 Procent oder sogar noch mehr (vgl. nachstehende Figur).

Dieses Ergebniss steht zu demjenigen von Carvallo und Weiss, welche bei symmetrischen Muskeln angeblich identische Werthe bekommen haben, in bestimmtem Widerspruche. Ueber die Ursache dieses abweichenden Ergebnisses der genannten Autoren wage ich nichts auszusprechen, da sie ihre Versuchsanordnung nicht angegeben haben (und da auch die Zahl der betreffenden von ihnen vorgenommenen Versuche nicht erwähnt wird). Jedenfalls kann ich nichts Anderes finden, als dass meine Versuchsanordnung einwandsfrei sein dürfte.

Da wir also betreffs des Festigkeitsgrades einen beträchtlichen Unterschied zwischen den symmetrischen Muskeln gefunden haben, ist es keine so ganz einfache Aufgabe, den Einfluss des Tetanisirens des Muskels auf seine Festigkeit zu bestimmen. Wie ich schon vorher auseinander gesetzt habe, kann es nämlich bei solchen Bestimmungen niemals erlaubt sein, mit jedem Muskel mehr als einen Versuch dieser Art auszuführen. Folglich giebt es meines Erachtens keinen anderen Weg, um zu einer Antwort auf die gestellte Frage zu gelangen, als die mühsame statistische.

Demnach habe ich eine etwas grössere Zahl Versuche ausgeführt. In einer Reihe habe ich die Zerreissung vorgenommen, wenn der eine Muskel in ruhendem Zustande verblieb, der symmetrische aber gerade vor dem Beginne der Dehnung in Tetanus versetzt worden war. Bei Zerreissung des tetanisirten Muskels habe ich immer die Dehnung bei der natürlichen Länge des Muskels anfangen lassen. Weiter habe ich Versuche gemacht, wo der eine Muskel in ruhendem Zustande war, der symmetrische sich in Tetanus befand, aber nach Einwirkung des tetanisirenden Reizes während der Dauer von 30 bis 60 Secunden schon ermüdet war. Bei anderen Versuchen bin ich in der Weise vorgegangen, den einen Muskel kurz vor dem Beginne der Dehnung in Tetanus zu versetzen, den anderen aber schon 30 bis 60 Secunden früher. Endlich habe ich einige Versuche vorgenommen, wo der Muskel erst, wenn seine Dehnung in geringerem Maasse angefangen hatte, in Tetanus versetzt wurde, der symmetrische Muskel aber in ruhendem Zustande verblieb.

Die Ergebnisse meiner Versuche führe ich unten in tabellarischer Form an. Mit ad. werden die mit den Adductoren vorgenommenen Versuche bezeichnet, mit ga. diejenigen mit den Gastrocnemii. — ruh. bezeichnet diejenigen Versuche, wo die beiden symmetrischen Muskeln in ruhendem Zustande zerrissen worden sind. Mit tet. werden die Versuche bezeichnet, wo der eine Muskel kurz vor dem Beginne der Dehnung in Tetanus versetzt worden ist; mit tet. 30″ diejenigen, wo Tetanus schon 30 bis 60 Secunden früher hervorgerufen worden

ist, und mit tet. w. diejenigen, wo Tetanus erst nach dem Beginne der Dehnung angefangen hat. Bei diesen drei Versuchsreihen ist der andere, symmetrische Muskel in ruhendem Zustande zerrissen worden. Als tet./tet. 30″ werden diejenigen Versuche bezeichnet, wo der eine Muskel kurz vor, der andere aber schon 30 bis 60 Secunden vor dem Beginne der Dehnung in Tetanus versetzt worden ist.

Bei jedem Versuchspaare habe ich die Differenz der Festigkeit der beiden symmetrischen Muskeln in Procenten des Festigkeitsmaasses des einen der betreffenden Muskeln ausgerechnet. In der Serie ruh. ist die Differenz in Procenten des kleineren Werthes jedes Versuchspaares berechnet und wird folglich immer positiv. Ich bin hier in dieser Weise vorgegangen, weil ich leider versäumt habe, in meinem Versuchsprotokolle rechts und links zu notiren. Folglich liefern meine Untersuchungen keinen Beitrag zu der Frage, ob sich eine Differenz zwischen den symmetrischen, linken bezw. rechten Muskeln in Bezug auf die absolute Festigkeit vorfindet.

Bei den drei Versuchsreihen tet., tet. 30″ und tet. w. ist die Differenz jedes Versuchspaares in Procenten der Festigkeit des ruhenden Muskels berechnet und hier (wie auch in der sofort nacher erwähnten Serie) haben wir demnach abwechselnd positive und negative Werthe dieser Differenz bekommen. Bei der Serie tet./tet. 30″ ist die Differenz in Procenten der Festigkeit des 30 bis 60 Secunden lang tetanisirten Muskels ausgedrückt.

Für jede einzelne Serie habe ich die durchschnittliche Differenz berechnet, indem ich das arithmetische Mittel der in Procenten ausgedrückten Differenzen jedes einzelnen Versuchspaares genommen habe. Diese durchschnittliche Differenz ist als a bezeichnet worden.

Da ein Unterschied sich zwischen den Werthen der symmetrischen Muskeln in ruhendem Zustande fast immer vorfindet, so hat man offenbar bei jeder Versuchsserie, wo man einen Faktor nur auf den einen Versuch jedes Versuchspaares hat einwirken lassen, eine gewisse durchschnittliche Abweichung zu erwarten — auch wenn der betreffende Faktor (wie z. B. Tetanus) auf die Festigkeit des Muskels gar keinen Einfluss ausgeübt hat. Die Grösse dieser Durchschnittsabweichung, welche man bei jeder Serie zu erwarten hat, auch wenn der bei der betreffenden Serie eingetretene Faktor die Festigkeit nicht verändert, hängt offenbar von der Zahl der Beobachtungen der betreffenden Serie ab. Es kann angenommen werden, dass die Grösse dieser durchschnittlichen Abweichung, welche man erwarten kann, im Verhältnisse $1/\sqrt{n}$ (wenn n die Zahl der Versuche bezeichnet) zum Werthe a der Serie ruh. steht. Nach dieser Formel

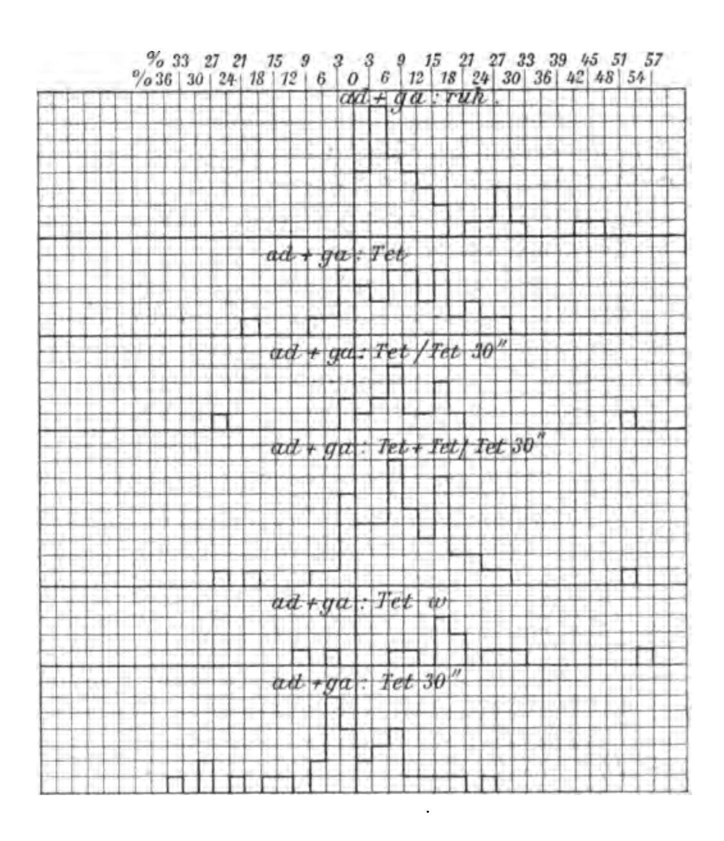
$$\frac{a \text{ der Serie ruh.}}{\sqrt{n}}$$

habe ich für die verschiedenen Versuchsreihen die Abweichung berechnet, welche man bei jeder Serie ohne einen Einfluss des Tetanus erwarten kann, und welche als b bezeichnet wird. In nachstehender Tabelle wird dieser Werth für jede Serie angegeben.

	Die benutzten Muskeln	Zahl der Versuche	a Die gefundene durchschnittl. Abweichung Proc.	b Die durchschn. Abw., welche man ohne einen Einfl. d. Tetanus erwarten kann, nach d. Formel $a/\sqrt{n}$ der Serie ruh. berechnet. Proc.	Der Werth a/b
ruh.	ad.	19	∓ 17·52		
	ga.	15	∓ 7·49		
	ad. + ga.	34	∓ 13·10		
tet.	ad.	20	+ 8·16	∓ 3·92	2·13
	ga.	12	+ 7·70	∓ 2·16	3·56
	ad. + ga.	32	+ 7·99	∓ 2·32	3·45
tet. 30″	ad.	20	− 2·235	∓ 3·92	0·57
	ga.	14	− 1·46	∓ 2·00	0·73
	ad. + ga.	34	− 1·91	∓ 2·25	0·85
tet./tet. 30″	ad.	12	+ 9·01	∓ 5·06	1·78
	ga.	5	+ 9·79	∓ 3·35	2·92
	ad. + ga.	17	+ 9·24	∓ 3·18	2·91
tet. w.	ad. + ga.	13	+ 17·97	∓ 3·63	4·95
tet. + tet./tet. 30″	ad. + ga.	49	+ 8·425	∓ 1·87	4·51
tet. + tet. w. + tet./tet. 30″	ad. + ga.	62	+ 10·43	∓ 1·66	6·27

Es ist sofort ersichtlich, welches grosse Gewicht man bei der Beurtheilung dieser Untersuchungen diesem Werthe b beilegen muss. Denn erst wenn die bei einer Serie gefundene durchschnittliche Abweichung diesen für dieselbe Serie berechneten Werth b deutlich übersteigt, ist man berechtigt, einen Einfluss des bei dieser Serie wirksamen Faktors anzunehmen.

Um eine weitere Uebersicht der bei den einzelnen Bestimmungen gefundenen Werthe geben zu können, ohne die sämmtlichen betreffenden Ziffern mittheilen zu brauchen, habe ich meine Untersuchungsergebnisse in einigen Curven (s. u. die Figur) zusammengestellt. Die Abscisse drückt die proportionale Differenz der verschiedenen Versuchs-



paare aus, und die Ausdehnung eines Viereckes entspricht einer Differenz von 3 Procent. Die Ordinate bezeichnet die Zahl der Versuche, und hier entspricht dieselbe Strecke je einem Versuchspaare. Jede Curve umfasst eine (oder mehrere) Versuchsserien und liefert eine Uebersicht über die Variabilität der verschiedenen Bestimmungen der betreffenden Serie.

Zuerst lenken wir unsere Aufmerksamkeit auf die obenstehende Tabelle. Was die Versuchsserie tet. betrifft, so ist die gefundene durchschnittliche Abweichung *(a)*, welche positiv ist, nicht so gross wie *a* in der Serie mit beiden Muskeln in ruhendem Zustande, ist

aber weit (3·45 Mal) grösser als diejenige Abweichung *(b)*, welche man ohne einen Einfluss des Tetanus erwarten konnte. Folglich muss man mit grosser Wahrscheinlichkeit annehmen, dass Tetanus die Festigkeit des Muskels erhöht, wenn der Muskel kurz vor dem Anfange der Dehnung in Tetanus versetzt worden ist.

Die Serie tet. 30″ giebt eine kleine negative Durchschnittsabweichung. Diese *(a)* ist jedoch sowohl für jede der Serien der Adductoren bezw. derjenigen der Gastrocnemii ausgerechnet, als für diese beiden Serien zusammengenommen, nicht so gross als diejenige durchschnittliche Abweichung *(b)*, welche man, der benutzten Berechnung nach, auch ohne einen Einfluss des Tetanus erwarten konnte. Die gefundene durchschnittliche Abweichung dieser beiden Serien müssen wir demnach als eine Zufälligkeit auffassen.

Damit stimmt auch das Ergebniss der Serie tet./tet. 30″ gut überein. Die gefundene Durchschnittsabweichung *(a)* dieser Serie fällt nämlich mit derjenigen der Serie tet. fast zusammen. Diese Thatsache, ebenso das Ergebniss der Serie tet. 30″ sprechen also dafür, dass der 30 oder 60 Secunden lang tetanisirte Muskel bei der Bestimmung der absoluten Festigkeit dieselben Werthe wie der ruhende Muskel ergiebt. Folglich kommen wir zu der Schlussfolgerung, dass der tetanisirende Reiz, wenn der Muskel durch denselben schon ermüdet worden ist, nicht im Stande ist, seine Festigkeit zu erhöhen, und auch nicht herabzusetzen.

Die Serie tet. w. zeigt eine bedeutende positive durchschnittliche Abweichung *(a)*, grösser als der Werh *a* der Versuchsserie mit den beiden symmetrischen Muskeln in ruhendem Zustande. Trotz der geringen Zahl der Versuche tet. w. (13) ist doch die gefundene Durchschnittsabweichung fast 5 (4·95) Mal grösser als die Abweichung *(b)*, welche man ohne einen Einfluss des Tetanus erwarten konnte. Da die gefundene Durchschnittsabweichung entschieden grösser ist als diejenige der Serie tet., können wir daraus schliessen, dass, wenn wir den Tetanus möglichst spät, mit anderen Worten, erst nach dem Anfange der Dehnung eintreten lassen, seine Fähigkeit, die Festigkeit des Muskels zu erhöhen, grösser ist, als wenn der Muskel etwas früher in Tetanus versetzt worden war. Diese Erscheinung muss offenbar in der Weise gedeutet werden, dass die Müdigkeit des Muskels sich in der Serie tet. schon zum Theil geltend gemacht hat.

Oben sind wir zu dem Schlusse gekommen, dass der tetanisirende Reiz, wenn der Muskel durch denselben schon ermüdet worden ist, keinen Einfluss auf seine Festigkeit ausübt. Wenn wir davon ausgehen, würden folglich die Werthe der Serie tet. und diejenigen der

Serie tet./tet. 30″ einander entsprechen. Wir können deshalb diese beiden Serien zusammenrechnen und bekommen dann, wie die Tabelle angiebt, als durchschnittliche Abweichung + 8·425 Procent, der entsprechende Werth *b* aber ist nur 1·87 Procent, also 4·51 Mal geringer. Nehmen wir mit diesen beiden Serien noch die Serie tet. w. zusammen, so erhalten wir als gefundene Durchschnittsabweichung + 10·43 Procent, als berechnete Abweichung, wenn Tetanus ohne Einfluss gewesen wäre, aber nur 1·66 Procent. Diese ist folglich mehr als 6 Mal geringer als jene. Wir finden folglich diejenige Schlussfolgerung, welche wir schon aus der Serie tet. gezogen haben, völlig bestätigt.

Wir lenken jetzt unsere Aufmerksamkeit auf die beigefügten Curven über die Variabilität der verschiedenen Bestimmungen. Bei Musterung dieser Curven können wir diejenigen der zwei Serien tet. und tet. 30″, einzeln für sich betrachtet, ausser Acht lassen, da wir schon vorher zu dem Schlusse gekommen sind, dass diese zwei Bestimmungsreihen einander entsprechen. Diese beiden Serien sind deshalb in eine Curve zusammengefasst worden, welche als tet. + tet./tet. 30″ bezeichnet wird. Vergleichen wir dieselbe mit der Curve tet. 30″, so tritt der Unterschied sehr deutlich hervor. Die Curven zeigen zwar viele Unregelmässigkeiten, eine natürliche Folge der geringen Zahl der Versuche, es lässt sich jedoch nicht verkennen, dass der positive und der negative Theil der Curve tet. 30″ einander einigermaassen entsprechen. Mit der Curve tet. + tet./tet. 30″ verhält sich die Sache in ganz anderer Weise: der negative Theil ist hier viel schwächer repräsentirt als der positive, und wenn jener seinen höchsten Punkt zwischen 0 und 3 Proc. erreicht, trifft dies für den positiven Theil erst zwischen 6 und 18 Proc. zu. Die Feststellung dieser Thatsache bestätigt unsere frühere Schlussfolgerung, dass der tetanisirende Reiz, wenn der Muskel kurz vor dem Anfange der Dehnung in Tetanus versetzt worden ist, die Festigkeit des Muskels vermehrt, wenn der Muskel aber durch die 30 bis 60 Secunden lange Einwirkung desselben schon ermüdet worden ist, die Festigkeit nicht verändert.

Es ist schon vorher erwähnt worden, dass die gefundene durchschnittliche Abweichung der Serie ruh. grösser ist als diejenige der Serie tet. + tet./tet. 30″. Dieser Umstand lässt sich ja aus den verschiedenen Berechnungsgründen erklären, welche angewendet worden sind, um die durchschnittliche Abweichung dieser Serien zu finden. Die Abweichungen der verschiedenen Versuchspaare in den Serien tet. und tet./tet. 30″ sind nämlich theils als positive, theils als negative, diejenigen in der Serie ruh. aber alle als positive berechnet worden.

Wenn die Ergebnisse der Serie ruh. in derselben Weise wie diejenige der anderen Serien berechnet worden wären, würden wir auch einen negativen Theil der Curve ruh. gehabt haben, und wenn die Zahl der Versuche eine genügende gewesen wäre, so wären der positive und der negative Theil der Curve mit einander symmetrisch geworden. Um die Curve ruh. mit den anderen Curven völlig vergleichbar zu machen, wäre es folglich nöthig gewesen, jene mit einem entsprechenden negativen Theile zu suppliren. Wenn wir aber diesen Unterschied der thatsächlich vorhandenen Curven in Erinnerung behalten, so dürfte ihre Vergleichung nicht ohne ein gewisses Interesse sein. Wir finden nämlich, dass der Gipfel der Curve ruh. näher an der Axe (nämlich zwischen 8 und 6 Procent) gelegen ist, als dies beim positiven Theile der Kurve tet. + tet./tet. 30″ der Fall ist (nämlich zwischen 6 und 18 Proc.), während der Gipfel des negativen Theiles dieser Curve gerade an der Axe gelegen ist. Diese Thatsache liefert offenbar einen neuen Beweis für den steigernden Einfluss des Tetanus auf die Festigkeit des Muskels

Was endlich die Curve tet. w. betrifft, so ist zwar die Zahl der Versuche sehr gering, die Curve deutet aber an, dass der Gipfel von der Axe noch weiter entfernt ist als bei der Curve tet. Dies bestätigt unsere frühere Schlussfolgerung, dass, wenn wir den Tetanus erst nach dem Anfange der Dehnung eintreten lassen, seine Fähigkeit, die Festigkeit des Muskels zu erhöhen, grösser ist, als wenn der Muskel etwas früher in Tetanus versetzt worden war.

Wir kommen also zu dem bestimmten Ergebnisse, dass der tetanisirte, nicht aber ermüdete Muskel eine höhere absolute Festigkeit besitzt als der ruhende.

Dieser Schluss steht mit den vorher citirten Untersuchungen von Wundt in Uebereinstimmung, oder wenigstens nicht im Widerspruche. Dieser Autor hatte nämlich gefunden, dass Tetanus die Festigkeit des Muskels nicht vermindert. Den weiteren Schluss von Wundt, dass Tetanus die Festigkeit auch nicht vermehrt, lasse ich hier ausser Acht, da Wundt denselben nicht experimentell geprüft hat.

Auch mit den oben erwähnten Untersuchungen von Carvallo und Weiss stimmen die meinigen in dem Punkte überein, dass Tetanus die absolute Festigkeit des Muskels steigert. Weiter aber glauben diese Autoren gefunden zu haben, dass der Festigkeitsgrad des tetanisirten Muskels, mit demjenigen des ruhenden verglichen, gerade eben so viel grösser ist, wie die Contractionskraft des betreffenden Muskels. Dazu muss erstens bemerkt werden, dass nicht erwähnt wird, unter welchen Bedingungen die Contractionskraft gemessen worden ist. Bekanntlich hängt aber diese Kraft u. A. vom Dehnungsgrade des Muskels ab. Aus

der citirten Arbeit von Blix wissen wir, dass die Contractionskraft des Muskels (wenn wir nur diese selbst berücksichtigen und den von der Elasticität bedingten Theil der Spannung ausser Betracht lassen) mit der Dehnung desselben abnimmt, und zwar in hohem Maasse. Auch kann ich nicht umhin, mich den bei der von Carvallo und Weiss benutzten Versuchsanordnung gewonnenen Ergebnissen gegenüber ablehnend zu verhalten, da dieselbe auch betreffs eines anderen Punktes, nämlich der behaupteten identischen Festigkeit der symmetrischen ruhenden Muskeln zu einer Schlussfolgerung geführt hat, welcher ich in Folge meiner Untersuchungen unmöglich zustimmen kann.

Bei einer ziemlich grossen Reihe von Präparaten habe ich gerade vor der Bestimmung der Festigkeit einen Versuch über die Contractionskraft des Muskels bei seiner natürlichen Länge ausgeführt. Eine Uebereinstimmung zwischen diesem Werthe und dem Unterschiede zwischen der Festigkeit des ruhenden und derjenigen des tetanisirten Muskels, wie Carvallo und Weiss gefunden haben, habe ich nicht gesehen. Was die hierher gehörigen Versuche mit den Adductoren betrifft, so habe ich im Allgemeinen die Contractionskraft einige Male grösser als den Unterschied zwischen der Festigkeit des ruhenden und derjenigen des tetanisirten Muskels gefunden. Trotz des beträchtlichen Wechsels betreffs der Grösse dieses Unterschiedes bei den verschiedenen Bestimmungen giebt es unter den betreffenden (21) Versuchen sogar keinen einzigen, bei welchem ich nicht die Contractionskraft grösser als den betreffenden Unterschied der Festigkeit gefunden habe.

Was die entsprechenden Versuche mit den Gastrocnemii betrifft, so verhält sich die Sache etwas anders. Hier ist nämlich die Contractionskraft, mit der Festigkeit des Muskels verglichen, weit geringer, als es bei den Adductoren der Fall ist. Diese Verschiedenheit hängt offenbar von dem verschiedenen Bau der verschiedenen Muskeln ab. Die Adductoren bestehen aus langen parallelen Fasern, die Musc. gastrocnemii aber aus sehr kurzen, zur Axe des Muskels schräg verlaufenden Fasern, und gerade der letztgenannte Umstand dürfte die relativ geringe Contractionskraft dieser Muskeln erklären. Der schräge Verlauf der Fasern bewirkt nämlich, dass nur ein Theil der Contractionskraft der einzelnen Muskelfasern sich als in der Richtung des Muskels wirkende Contractionskraft des Muskelbauches selbst geltend machen kann. In Uebereinstimmung mit dieser geringeren Contractionskraft der Gastrocnemii ist es auch bei einigen Versuchen mit diesen Muskeln vorgekommen, dass ihre Contractionskraft geringer als der Unterschied zwischen der Festigkeit des ruhenden und derjenigen des

tetanisirten Muskels gewesen war. Eine Uebereinstimmung zwischen diesen beiden Werthen habe ich dagegen nicht gefunden.

Meine Untersuchung erlaubt folglich nicht die Schlussfolgerung, dass der gesteigerte Festigkeitsgrad des tetanisirten Muskels ein directes Ergebniss der Contractionskraft des Muskels darstelle. Vielleicht dürfte die vermehrte Festigkeit des tetanisirten Muskels in folgender Weise zu erklären sein. Es kann angenommen werden, dass die Muskeln aus Fasern von verschiedener Länge bestehen. Folglich, wenn der Muskel in ruhendem Zustande zerrissen wird, liegt es nahe anzunehmen, dass zuerst die kürzeren, nachher die längeren Fasern bersten. Andererseits, wenn der Muskel während des Tetanus zerrissen wird, lässt es sich sehr gut denken, dass die kürzeren Fasern bei der Dehnung durch die längeren besser unterstützt werden, so dass die Spannung sich in gleichförmigerer Weise als in ruhendem Zustande auf sämmtliche Fasern vertheilt, wodurch vor dem Beginne der Berstung eine höhere Spannung erreicht wird. Ich will jedoch auf diese rein theoretischen Erwägungen nicht weiter eingehen.

Analyse von Muskelcurven.[1]

Von

K. Hällstén.

III. Geometrische und kinematische Eigenschaften der Muskelcurven.

Zunächst werden wir hier einige geometrische und kinematische Eigenschaften der Muskelcurven berücksichtigen. Zu diesem Zwecke sind — in Uebereinstimmung mit den in den Abtheilungen I und II behandelten Versuchsanordnungen — verschiedene Fälle zu unterscheiden, je nachdem die Schreibfläche und das bewegliche System gedreht oder verschoben werden. Von den vier möglichen Anordnungen ist diejenige, wo beide gedreht werden, die allgemeinste, und schliesst die übrigen als specielle Fälle in sich ein, weil — wie im Zusatz zu Abtheilung II hervorgehoben wurde — eine Verschiebung eines Systems als specieller Fall eines gedrehten betrachtet werden kann. Hieraus geht hervor, dass alle Eigenschaften der Muskelcurve bei der genannten Anordnung auch bei den übrigen in Rede stehenden, wenn auch in etwas anderen Formen, hervortreten. Wir behandeln also diese Anordnung zuerst.

A. Die Schreibfläche und das bewegliche System werden gedreht.

Diese Anordnung der Versuche war die von Dr. Clopatt in seiner oben genannten Untersuchung angewandte; in seiner Abhandlung sind auch die Eigenschaften der Muskelcurve berücksichtigt. Wegen des Zusammenhanges und wegen einiger speciellen Fragen, die wir in der Folge berücksichtigen wollen, werden wir jedoch hier auch dieser Anordnung Aufmerksamkeit widmen.

[1] Der Redaction am 16. October 1901 zugegangen.

1. Einleitung. Die nachstehende Fig. 4 stellt die geometrischen Verhältnisse bei dieser Anordnung, auf welche die folgende Untersuchung sich stützt, dar. Die gemeinsamen Bezeichnungen hier und in der Fig. 2 haben dieselbe Bedeutung, nur den Bogen $S_0\,\alpha$, der die Zeit t des Curvenpunktes xy bestimmt, rechnen wir hier nicht vom Punkte t_0 des Anfangskreises (S_0), sondern von t_1 ab, weil dadurch die folgenden Berechnungen ein wenig vereinfacht werden. Die Geraden S und S_1 in der Figur bezeichnen die Radii Vectores des Curvenpunktes xy bezw. des Drehungspunktes $x_\varrho y_\varrho$ des beweglichen Systems vom Mittelpunkte O der Schreibfläche gerechnet; die Kreise

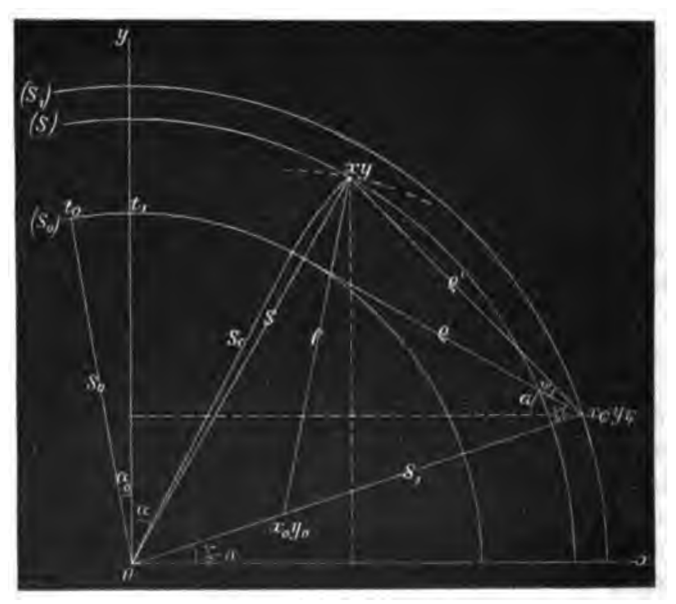


Fig. 4.

mit O als Mittelpunkt und S bezw. S_1 als Halbmesser bezeichnen wir kurz: Kreis (S) bezw. Kreis (S_1).

In der Figur ist weiter ein rechtwinkliges Axensystem xy mit dem Anfangspunkte in 0 und mit der positiven y-Axe durch den Punkt t_1 aufgezogen; die positive x-Axe ist nach der Seite, wo die Muskelcurve (rechts in der Figur) gelegen ist, gerichtet.

Aus der Figur ist zu ersehen, dass der Schreibarm in der Anfangslage ϱ zur Zeit t mit der negativen x-Axe den Winkel α, und in der Secundärlage ϱ' zur selben Zeit t den Winkel $(\alpha + \psi)$ macht; ebenso dass der Winkel $(S_1\,x)$ den Werth $(\zeta - \alpha)$ hat, wenn ζ den Winkel $(\varrho\,S_1)$ bezeichnet.

2. **Die Constanten der Curve. Die Coordinaten des Curvenpunktes** xy. Der Drehungspunkt $x_c y_c$ bleibt in jeder Lage des Schreibarmes auf dem Umfange des Kreises (S_1); der Abstand S_1 des Punktes $x_c y_c$ vom Punkte O, ebenso wie der Winkel ζ sind also constante Grössen, können aber durch die Constanten S_0 und ϱ ausgedrückt werden, weil, wie die Figur zeigt:

$$(16a)\quad \begin{cases} S_1 \sin\zeta = S_0 \\ S_1 \cos\zeta = \varrho \end{cases};\quad \text{wovon:}\quad \begin{aligned} & \operatorname{tg}\zeta = \frac{S_0}{\varrho} \\ & S_1 = \frac{\varrho}{\cos\zeta} = \frac{S_0}{\sin\zeta} = \varrho\sqrt{1 + \left(\frac{S_0}{\varrho}\right)^2}. \end{aligned}$$

In den folgenden Gleichungen, welche die Eigenschaften der betreffenden Muskelcurve bestimmen, sind also die Grössen S_0, ϱ, S_1 und ζ, oder kürzer nach den Beziehungen (16a) S_0 und ϱ, nebst der Winkelgeschwindigkeit o der Schreibfläche, Constanten.

Werden weiter für die in der Folge oft vorkommenden Ausdrücke $S_1 \sin(\zeta + \psi)$ und $S_1 \cos(\zeta + \psi)$ die verkürzten Bezeichnungen bezw. h und k eingeführt, so ist

$$(16b)\quad \begin{cases} h = S_1 \sin(\zeta + \psi) = S_0 \cos\psi + \varrho \sin\psi \\ k = S_1 \cos(\zeta + \psi) = \varrho \cos\psi - S_0 \sin\psi \end{cases}.$$

Die Fig. 4 und die ersten Gleichungen 16a zeigen, dass:

$$(16c)\quad \begin{cases} y_c = S_1 \sin(\zeta - \alpha) = S_0 \cos\alpha - \varrho \sin\alpha \\ x_c = S_1 \cos(\zeta - \alpha) = \varrho \cos\alpha + S_0 \sin\alpha \end{cases}.$$

Aus nächstvorangehenden Gleichungen folgt, dass:

$$(16d)\quad \begin{cases} y_c \cos(\alpha + \psi) + x_c \sin(\alpha + \psi) = S_1 \sin(\zeta + \psi) = h \\ x_c \cos(\alpha + \psi) - y_c \sin(\alpha + \psi) = S_1 \cos(\zeta + \psi) = k \end{cases}.$$

Schliesslich zeigt die Figur, dass die Coordinaten des betreffenden Curvenpunktes xy durch folgende Gleichungen bestimmt sind:

$$(16e)\quad \begin{cases} y - y_c = \varrho' \sin(\alpha + \psi) \\ x_c - x = \varrho' \cos(\alpha + \psi) \end{cases},\quad \text{wovon:}\quad \begin{aligned} y &= y_c + \varrho \sin(\alpha + \psi) \\ x &= x_c - \varrho \cos(\alpha + \psi) \end{aligned};$$

der Winkel $\llcorner(Sx)$ wird hiermit bestimmt von:

$$(16f)\quad \begin{cases} S \sin \llcorner(Sx) = y \\ S \cos \llcorner(Sx) = x \end{cases};$$

also:

$$tg \llcorner(Sx) = \frac{y}{x} = \frac{y_c + \varrho \sin(\alpha + \psi)}{x_c - \varrho \cos(\alpha + \psi)}$$

$$S^2 = x^2 + y^2 = y_c^2 + x_c^2 + \varrho^2 - 2\varrho\,[x_c \cos(\alpha + \psi) - y_c \sin(\alpha + \psi)] = S_1^2 + \varrho^2 - 2\varrho k$$

3. **Die Tangente und der Krümmungshalbmesser des Punktes** xy. Die unbekannte Function, die bestimmt, wie die Ordinate y, von der Abscisse x abhängt, sei:

$$y = f(x); \tag{17a}$$

$f'(x)$ und $f''(x)$ seien der erste und der zweite Differentialcoëfficient dieser Function in Beziehung auf x; weil hier x und y Functionen der Zeit t sind, so haben diese Coëfficienten die Werthe:

$$f'(x) = \frac{dy}{dt} : \frac{dx}{dt}; \text{ und: } f''(x) = \left[\frac{dx}{dt}\frac{d^2y}{dt^2} - \frac{dy}{dt}\frac{d^2x}{dt^2}\right] : \left(\frac{dx}{dt}\right)^3. \tag{17b}$$

Bezeichnet daher ϑ den Winkel der Tangente im Punkte xy mit der x-Axe und r den Krümmungshalbmesser desselben Punktes, so sind:

$$\left\{\begin{aligned} &\operatorname{tg}\vartheta = \frac{dy}{dx} = \frac{dy}{dt} : \frac{dx}{dt} = f'(x); \\ &\text{und:} \\ &r = \frac{[1 + (f'(x))^2]^{3/2}}{f''(x)} = \frac{\left[\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2\right]^{3/2}}{\frac{dx}{dt}\frac{d^2y}{dt^2} - \frac{dy}{dt}\frac{d^2x}{dt^2}}. \end{aligned}\right. \tag{17c}$$

Vermittelst dieser Gleichungen (17c) und der oben angegebenen Werthe der Coordinaten xy können einige geometrische und kinematische Eigenschaften der Muskelcurve näher bestimmt werden.

4. **Die Geschwindigkeit** $d\sigma/dt$ **längs der Curve und die Winkelgeschwindigkeit** ω **im Punkte** xy. Die Coëfficienten dy/dt und dx/dt sind die Componenten längs den Axen der Geschwindigkeit, mit welcher die Schreibspitze im Punkte xy längs der Curve bewegt wird, und deren Verhältniss ist nach der Gleichung (17c) die Richtung der Tangente und damit die der Geschwindigkeit. Bezeichnet daher $d\sigma$ ein Element der Curve im Punkte xy, das in der Zeit dt von der Schreibspitze überfahren wird, so dass $d\sigma/dt$ die Geschwindigkeit bedeutet, so ist:

$$\left\{\begin{aligned} \frac{d\sigma}{dt}\sin\vartheta &= \frac{dy}{dt} \\ \frac{d\sigma}{dt}\cos\vartheta &= \frac{dx}{dt} \end{aligned}\right.; \quad \text{wovon:} \quad \begin{aligned} &\operatorname{tg}\vartheta = \frac{dy}{dt} : \frac{dx}{dt} \\ &\left(\frac{d\sigma}{dt}\right)^2 = \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dx}{dt}\right)^2. \end{aligned} \tag{18a}$$

Die Werthe für dy/dt und dx/dt sind von den Gleichungen (16c) und (16e) herzuleiten und werden:

$$\left\{\begin{aligned} \frac{dy_c}{dt} &= -S_1\, o\cos(\zeta - \alpha) = -o x_c; & \frac{dy}{dt} &= -o x_c + \varrho(o + \omega)\cos(\alpha + \psi), \\ \frac{dx_c}{dt} &= S_1\, o\sin(\zeta - \alpha) = o y_c; & \frac{dx}{dt} &= o y_c + \varrho(o + \omega)\sin(\alpha + \psi), \end{aligned}\right. \tag{18b}$$

weil $d\alpha/dt$ die Winkelgeschwindigkeit o der Schreibfläche und $d\psi/dt$ die Winkelgeschwindigkeit ω des beweglichen Systems bezeichnet. Die Gleichungen (18a) werden daher vermittelst der Gleichungen (16c):

$$(18c)\begin{cases} \frac{d\sigma}{dt}\sin\vartheta = \frac{dy}{dt} = -S_1\, o\cos(\zeta-\alpha) + \varrho(o+\omega)\cos(\alpha+\psi), \\ \frac{d\sigma}{dt}\cos\vartheta = \frac{dx}{dt} = \quad S_1\, o\sin(\zeta-\alpha) + \varrho\,(o+\omega\,(\sin\,(\alpha+\psi). \end{cases}$$

$$(18d)\begin{cases} \operatorname{tg}\vartheta = \frac{-S_1\, o\cos(\zeta-\alpha)+\varrho(o+\omega)\cos(\alpha+\psi)}{S_1\, o\sin(\zeta-\alpha)+\varrho(o+\omega)\sin(\alpha+\psi)}, \\ \left(\frac{d\sigma}{dt}\right)^2 = \varrho^2(o+\omega)^2 + S_1^{\,2}o^2 - 2\varrho\, o(o+\omega)k, \end{cases}$$

wo in der letzten Gleichung für $S_1\cos(\zeta+\psi)$ sein Werth k nach der Gleichung (16b) eingeführt ist.

Die Gleichungen (18c) geben weiter:

$$(18e)\begin{cases} \frac{d\sigma}{dt}\sin(\vartheta+\alpha+\psi) = \varrho(o+\omega) - o\,k \\ \frac{d\sigma}{dt}\cos(\vartheta+\alpha+\psi) = \qquad o\,h \end{cases};$$

also:

$$\operatorname{tg}(\vartheta+\alpha+\psi) = \frac{\varrho(o+\omega)-o\,k}{o\,h}.$$

Bezeichnet Θ den spitzen Winkel zwischen dem Schreibarm ϱ' und dem Elemente $d\sigma$ der Curve oder der Tangente im Punkte xy, so ist:

$$\vartheta + \alpha + \psi = \Theta$$

und die letzten Gleichungen werden:

$$(18f)\quad\begin{cases} \frac{d\sigma}{dt}\sin\Theta = \varrho(o+\omega) - o\,k \\ \frac{d\sigma}{dt}\cos\Theta = \qquad o\,h \end{cases}\qquad \operatorname{tg}\Theta = \frac{\varrho(o+\omega)-o\,k}{o\,h};$$

die ersten dieser Gleichungen bestimmen die Componenten der Geschwindigkeit $d\sigma/dt$ längs einer Senkrechten gegen den Schreibarm ϱ' und längs dem Schreibarme. In Bezug auf die Frage, wie der Winkel Θ im Verlaufe der Curve sein Zeichen verändert, verweisen wir auf die Abhandlung von Dr. Clopatt.[1] Die letzte Gleichung und die zweite geben:

---

[1] A. Clopatt, a. a. O. *Dies. Archiv.* Bd. X. S. 271 bis 272.

$$(18g)\quad \begin{cases} o + \omega = \dfrac{S_1\, o}{\varrho}\, \dfrac{\cos(\zeta + \psi - \Theta)}{\cos\Theta} \\ \dfrac{d\sigma}{dt} = \dfrac{o\, h}{\cos\Theta}. \end{cases}$$

Vermittelst dieser Gleichungen können die Winkelgeschwindigkeit ω und die Geschwindigkeit $d\sigma/dt$ in jedem Punkte xy, für welchen die Lage α, ψ und der Winkel Θ bestimmt oder gemessen sind, berechnet werden.

5. Die Beschleunigung Φ im Punkte xy. Weil $d\sigma/dt$ die Geschwindigkeit längs der Curve und r den Krümmungshalbmesser im Punkte xy bezeichnet, so haben die Normal- und Tangential-Componenten Φ_n und Φ_t der Beschleunigung Φ die allgemeinen Werthe:

$$\Phi_n = \frac{1}{r}\left(\frac{d\sigma}{dt}\right)^2; \quad \text{und} \quad \Phi_t = \frac{d\left(\dfrac{d\sigma}{dt}\right)}{dt},$$

also in Folge der Gleichungen (17c) und (18a):

$$(19a)\quad \begin{cases} \Phi_n = \left[\dfrac{dx}{dt}\dfrac{d^2y}{dt^2} - \dfrac{dy}{dt}\dfrac{d^2x}{dt^2}\right] : \dfrac{d\sigma}{dt}; \\ \text{und} \\ \Phi_t = \left[\dfrac{dy}{dt}\dfrac{d^2y}{dt^2} + \dfrac{dx}{dt}\dfrac{d^2x}{dt^2}\right] : \dfrac{d\sigma}{dt}. \end{cases}$$

Vermittelst des Winkels $\llcorner(\Phi x)$ oder μ, den die Richtung der Beschleunigung Φ mit der x-Axe macht, können die Componenten Φ_t und Φ_n auch unter den Formen:

$$(19b)\quad \begin{cases} \Phi_t = \Phi\cos(\mu - \vartheta) \\ \Phi_n = \Phi\sin(\mu - \vartheta) \end{cases}$$

geschrieben werden.

Die Grössen d^2y/dt^2 und d^2x/dt^2 bezeichnen die Componenten der Beschleunigung Φ längs der Axen, also $\Phi\sin\mu$ und $\Phi\cos\mu$; ihre Werthe sind von den Gleichungen (18b) herzuleiten und werden:

$$(19c)\quad \begin{cases} \Phi\sin\mu = \dfrac{d^2y}{dt^2} = -o^2 y_c - \varrho(o+\omega)^2\sin(\alpha+\psi) + \varrho\,\omega'\cos(\alpha+\psi), \\ \Phi\cos\mu = \dfrac{d^2x}{dt^2} = -o^2 x_c + \varrho(o+\omega)^2\cos(\alpha+\psi) + \varrho\,\omega'\sin(\alpha+\psi), \end{cases}$$

weil die Winkelgeschwindigkeit o der Schreibfläche constant ist und die Winkelbeschleunigung $d\omega/dt$ vorher (in der Abtheilung I) mit ω' bezeichnet wurde.

Des Weiteren brauchen wir auf diese Frage hier nicht einzugehen.

6. Das Momentancentrum des Curvenpunktes xy. In der

Wirklichkeit entsteht die Muskelcurve durch die beiden gleichzeitigen Bewegungen, die des beweglichen Systems in Folge der Muskelverkürzung und die der Drehung der Schreibfläche. Diese Bewegungen, die um parallele Axen geschehen, können doch durch eine einzige Bewegung des beweglichen Systems ersetzt werden; zu diesem Zwecke nehmen wir an, dass dem zusammengesetzten Systeme, welches das bewegliche System (nebst den damit vereinigten Theilen) und die Schreibfläche zusammen bilden, eine gemeinsame Drehung um die Drehungsaxe der Schreibfläche, mit derselben constanten Winkelgeschwindigkeit o wie die der Schreibfläche, aber in entgegengesetzter Richtung ertheilt wird, — hierbei vorausgesetzt, dass das bewegliche System jedenfalls in derselben Weise bewegt wird, wie in der Wirklichkeit. Unter diesen Verhältnissen muss die Schreibfläche zwei Drehungen um dieselbe Axe, mit denselben Winkelgeschwindigkeiten o, aber in entgegengesetzten Richtungen ausführen; diese beiden Bewegungen heben also einander auf, und die Schreibfläche bleibt in Ruhe. Das bewegliche System aber, das die Curve zeichnet, muss gleichzeitig zwei Drehungen um parallele Axen ausführen; die eine Drehung ist die wirkliche in Folge der Muskelverkürzung um die Axe durch den Punkt $x_c y_c$ mit der Winkelgeschwindigkeit ω, die andere geschieht um die Axe durch den Mittelpunkt O, mit der constanten Winkelgeschwindigkeit o, in entgegengesetzter Richtung aber gegen die Drehung der Schreibfläche. Diese beiden Drehungen um parallele Axen können von einer einzigen Drehung ersetzt werden. Zu diesem Zwecke sei bemerkt, dass in unseren Versuchsanordnungen beide Drehungen in derselben Richtung, und zwar in der der Uhrzeiger geschehen, so lange der aufsteigende Schenkel gezeichnet wird; dagegen wird während der Verzeichnung des herabsteigenden Schenkels die Drehung des beweglichen Systems die entgegengesetzte werden. Im vorigen Falle haben die Winkelgeschwindigkeiten dasselbe Zeichen, und zwar positives, weil ψ in diesem Gebiete der Curve mit der Zeit t zunimmt; im letzteren Falle ist o positiv, ω aber negativ. In beiden Fällen liegt die Axe der ersetzenden oder der zusammengesetzten Drehung in der Ebene der ursprünglichen Axen, und schneidet also die Gerade S_1 oder ihre Verlängerung; dieser Punkt, in der Figur 4 mit $x_0 y_0$ bezeichnet, ist das Momentancentrum des Curvenpunktes xy, und liegt für die Punkte xy des aufsteigenden Schenkels zwischen O und $x_c y_c$, für die Punkte des herabsteigenden Schenkels aber auf der Verlängerung von S_1 nach der Seite vom Punkte O, weil in unseren Versuchen o (viele Male, etwa 3 bis 4 Mal) grösser, als der maximale Werth ω annehmen kann, ist, so dass $(o - \omega)$ immer positives Zeichen hat.

Um die Lage des Momentancentrums näher zu bestimmen, seien d und δ die Abstände dieses Punktes von bezw. O und $x_c y_c$, so dass

(20a) $$d + \delta = S_1.$$

Die Lage des Punktes ist dann bestimmt vermittelst der Gleichungen:

(20b) $$\frac{o}{\delta} = \frac{\omega}{d} = \frac{o + \omega}{S_1},$$

also:

(20c) $$\delta = \frac{S_1 o}{o + \omega}; \quad d = \frac{S_1 \omega}{o + \omega}; \quad \text{und:} \quad \frac{d}{\delta} = \frac{\omega}{o}.$$

Diese Gleichungen beziehen sich, wie in der Figur 4, auf die Punkte des aufsteigenden Schenkels, gelten aber auch für Punkte des herabsteigenden; dann ist ω negativ zu nehmen, wodurch im vorliegenden Falle δ positiv, aber d negativ wird, weil $(o - \omega)$ hier positiv ist, wie oben erwähnt wurde.

Den Abstand des Momentancentrums vom Punkte xy der Curve bezeichnen wir mit f; in dem, von den Geraden f, ϱ' und. δ gebildeten Dreiecke ist der gegen die Seite f stehende Winkel $(\zeta + \psi)$, daher:

$$f^2 = \varrho^2 + \delta^2 - 2\varrho\delta\cos(\zeta + \psi),$$

also nach den Gleichungen (20c):

(20d) $$f^2 = \varrho^2 + \frac{S_1^2 o^2}{(o + \omega)^2} - \frac{2\varrho S_1 o}{o + \omega}\cos(\zeta + \psi) = \varrho^2 + \frac{S_1^2 o^2}{(o + \omega)^2} - \frac{2\varrho o}{o + \omega} k.$$

Die letzte Gleichung giebt weiter, wenn zugleich der Werth von $d\sigma / dt$ in der Gleichung (18d) berücksichtigt wird:

(20e) $$f^2 (o + \omega)^2 = \varrho^2 (o + \omega)^2 + S_1^2 o^2 - 2\varrho o (o + \omega) k = \left(\frac{d\sigma}{dt}\right)^2;$$

also:

(20f) $$f(o + \omega) = \frac{d\sigma}{dt}; \quad \text{und} \quad f(d\alpha + d\psi) = d\sigma.$$

Die drei Bogen: $f d\alpha$, $f d\psi$ und $d\sigma$ entstehen während derselben Zeit dt; nach der letzten Gleichung kann also das Curvenelement $d\sigma$ betrachtet werden als dadurch entstanden, dass das bewegliche System während der Zeit dt den Winkel $(d\alpha + d\psi)$ um das Momentancentrum gedreht wurde.

Hieraus schon geht hervor, dass die Linie f die Normale der Curve im Punkte xy ist, und dass daher der Winkel $\llcorner (f\varrho')$ zwischen f und ϱ' — wie die Figur andeutet — den Werth:

(20g) $$\llcorner (f\varrho') = \frac{\pi}{2} = \Theta$$

hat, weil Θ der spitze Winkel zwischen der Tangente und ϱ' ist. Dies Resultat steht übrigens in Uebereinstimmung mit einer allgemeinen Regel für Bewegungen dieser Art; in jeder Lage liegt nämlich das eine Ende des Schreibarmes ϱ auf der Muskelcurve, das andere auf dem Kreise (S_1); und die betreffende Regel besagt, dass das Momentancentrum im Durchschnittspunkte der Normalen der beiden Curven in den Endpunkten der Geraden ϱ liegt.

Die Verhältnisse des Momentancentrums lassen die geometrische Bedeutung der Ausdrücke:

$$\frac{\frac{S_1^2 o}{o+\omega} - \varrho k}{\varrho k} \quad \text{oder} \quad \frac{\delta - \varrho \cos(\zeta + \psi)}{\varrho \sin(\zeta + \psi)},$$

bestimmen, welche nach den Gleichungen (16b) und (20c) einander gleich sind und in der Folge hervortreten. Wird nämlich in der Figur 4 eine Senkrechte als vom Punkte xy gegen S_1 gezogen gedacht, so entsteht ein rechtwinkliges Dreieck, worin die Linie f Hypothenuse ist und die anderen Seiten die Werthe:

$$\delta - \varrho \cos(\zeta + \psi) \quad \text{und} \quad \varrho \sin(\zeta + \psi)$$

haben. In diesem Dreiecke hat weiter der Winkel $\llcorner(f\delta)$ zwischen f und δ in Folge der Gleichung (20g) den Werth:

$$\llcorner(f\delta) = \pi - \left[\zeta + \psi + \frac{\pi}{2} - \Theta\right] = \frac{\pi}{2} - (\zeta + \psi - \Theta);$$

der andere spitze Winkel hat also den Werth $(\zeta + \psi - \Theta)$. Hieraus geht hervor, dass:

$$\text{(20h)} \qquad \operatorname{tg}(\zeta + \psi - \Theta) = \frac{\delta - \varrho \cos(\zeta + \psi)}{\varrho \sin(\zeta + \psi)} = \frac{\frac{S_1^2 o}{o+\omega} - \varrho k}{\varrho k}.$$

7. **Einige bemerkenswerthe Punkte auf der Muskelcurve.** Auf der Muskelcurve finden sich eine Menge Punkte, die durch bestimmte Gleichungen charakterisirt sind; von diesen werden wir hier besonders solche berücksichtigen, deren Bedingungsgleichungen dazu dienen können, den Werth der Winkelbeschleunigung ω' in dem betreffenden Punkte zu berechnen; diese Punkte sind alle dadurch charakterisirt dass in denselben die eine oder die andere der oben definirten Grössen einen maximalen oder minimalen Werth annimmt. Ein solcher Punkt kann schon bei Betrachtung der Curve der Lage nach einigermassen bestimmt werden, nämlich ein Inflexionspunkt im Anfange der Curve, wo der Tangentenwinkel ϑ einen maximalen Werth annimmt, und den wir daher mit $\vartheta_{\max}$ oder kürzer ϑ_m bezeichnen. Bei Messung des Winkels Θ

zeigt sich weiter, dass dieser Winkel auf dem aufsteigenden Schenkel einen maximalen Werth Θ_m annimmt. Schliesslich findet man durch Berechnungen, dass auf dem aufsteigenden Schenkel die oben definirten Grössen f und $(\zeta + \psi - \Theta)$ einen minimalen Werth, bezw. f_m und $[\zeta + \psi - \Theta]_m$, und $d\sigma / dt$ einen maximalen $(d\sigma / dt)_m$ annehmen. Die Bedingungsgleichungen dieser Punkte geben wir in der Folge, die diese Punkte vom Anfange der Curve auf dem aufsteigenden Schenkel einnehmen, an.

Der Inflexionspunkt ϑ_m. Im Inflexionspunkte hat $f''(x)$ den Werth Null; die Bedingungsgleichung ist also nach der Gleichung (17b):

$$f''(x) = \frac{dx}{dt}\frac{d^2y}{dt^2} - \frac{dy}{dt}\frac{d^2x}{dt^2} = 0.$$

Diese Gleichung zeigt, dass in diesem Punkte ϑ und $\operatorname{tg}\vartheta$ einen maximalen oder minimalen Werth annehmen, weil der allgemeine Werth für $\operatorname{tg}\vartheta$, nach der Gleichung (17c), $dy/dt : dx/dt$ ist, und weiter nach der Gleichung (19a), dass hier die Normalcomponente Φ_n der Beschleunigung den Werth Null hat. Diese Bedingungsgleichung kann, vermittelst der Gleichungen (18b) und (19c), unter die Form:

$$\frac{\omega'}{(o+\omega)^2} = \frac{\varrho(o+\omega) - ok}{oh} + \frac{o}{o+\omega}\,\frac{\left[\frac{S_1^2 o}{o+\omega} - \varrho k\right]}{\varrho h}$$

gebracht werden, also nach den Gleichungen (18f) und (20h):

$$\text{(21a)} \qquad \frac{\omega'}{(o+\omega)^2} = \operatorname{tg}\Theta + \frac{o}{o+\omega}\operatorname{tg}(\zeta + \psi - \Theta),$$

im Anfange der Curve, wo der Inflexionspunkt gelegen ist, ist nämlich Θ positiv und hat den Werth:

$$\Theta = \vartheta + \alpha + \psi.$$

Vermittelst der letzten Gleichung kann die Lage des betreffenden Punktes bezw. die Grenzen, zwischen welchen derselbe liegt, näher bestimmt werden.

Der Punkt f_m. Damit f einen minimalen Werth annehme, giebt die Gleichung (20d) die Bedingung:

$$-\omega'[S_1^2 o - \varrho(o+\omega)k] + \varrho\,\omega(o+\omega)^2 h = 0,$$

also nach der Gleichung (20h):

$$\text{(21b)} \qquad \frac{\omega'}{\omega(o+\omega)} = \frac{1}{\operatorname{tg}(\zeta + \psi - \Theta)} = \operatorname{cotg}(\zeta + \psi - \Theta).$$

Der Punkt $(\zeta + \psi - \Theta)_m$. In Folge der Gleichung (20h) nimmt

der Winkel $(\zeta + \psi - \Theta)$ und seine Tangente einen minimalen Werth $(\zeta + \psi - \Theta)_m$ an, wenn die Bedingungsgleichung:

$$S_1\, \omega' o \sin(\zeta + \psi) - \omega(o + \omega)[\varrho(o + \omega) - S_1\, o \cos(\zeta + \psi)] = 0,$$

oder nach den Gleichungen (16b):

$$\omega' o h - \omega(o + \omega)[\varrho(o + \omega) - o k] = 0$$

erfüllt ist, d. h. nach der Gleichung (18f):

$$\frac{\omega'}{\omega(o + \omega)} = \operatorname{tg} \Theta, \tag{21c}$$

weil in dem Gebiete der Curve, wo $(\zeta + \psi - \Theta)_m$ gelegen ist, Θ und $\operatorname{tg}\Theta$ in der Gleichung (18f) positiv sind.

Der Punkt Θ_m liegt auch in dem Theile der Curve, wo Θ und $\operatorname{tg}\Theta$ in der Gleichung (18f) positiv sind; die Bedingungsgleichung für Θ maximum ist daher:

$$\varrho\, \omega' h + \omega[S_1^2 o - \varrho_1(o + \omega) k] = 0,$$

d. h. nach der Gleichung (20h):

$$\frac{\omega'}{\omega(o + \omega)} = -\operatorname{tg}(\zeta + \psi - \Theta). \tag{21d}$$

Dieser Punkt Θ_m und der vorige $(\zeta + \psi - \Theta)_m$ liegen sehr nahe an einander, Θ_m aber weiter vom Anfange der Curve als $(\zeta + \psi - \Theta)_m$; die Bedingungsgleichungen (21c) und (21d) ergeben aber im Punkte $(\zeta + \psi - \Theta)_m$ für ω' einen positiven und im Punkte Θ_m einen negativen Werth; zwischen diesen beiden Punkten muss also die Winkelbeschleunigung ω' den Werth Null annehmen; hiermit wird die Lage des Curvenpunktes angedeutet, wo die Winkelgeschwindigkeit ω ihren maximalen Werth ω_m annimmt.

Der Punkt $(d\sigma / dt)_m$. Die Bedingung für das Maximum der Geschwindigkeit $d\sigma / dt$ giebt die Gleichung (18a) unter der Form:

$$\frac{dy}{dt}\frac{d^2y}{dt^2} + \frac{dx}{dt}\frac{d^2x}{dt^2} = 0;$$

nach der Gleichung (19a) ist hiermit gezeigt, dass in diesem Punkte die Tangentialcomponente Φ_t der Beschleunigung den Werth Null hat. Vermittelst der Gleichungen (18b) und (19c) nimmt die obige Bedingungsgleichung folgende Form an:

$$\omega'[\varrho(o + \omega) - o k] + \omega o(o + \omega) h = o,$$

d. h. nach Gleichung (18f), wo im linken Gliede $\operatorname{tg}\Theta$ im vorliegenden Falle positiv ist:

(21e) $$\frac{\omega'}{\omega(o+\omega)} = -\frac{1}{\operatorname{tg}\Theta} = -\operatorname{cotg}\Theta.$$

Der Curvengipfel ψ_m. In diesem Punkte nimmt nicht nur der Drehungswinkel ψ, sondern auch der Radius Vector S einen maximalen Werth an; die Bedingungsgleichung wird daher:

(21f) $$2\,\varrho, S_1\,\omega \sin(\zeta + \psi) = 0;\ \text{also:}\ \omega = 0$$

in Folge des Werthes für S^2 in der Gleichung (16f). Im Punkte ψ_m verändert ω das Zeichen und das bewegliche System fängt an zu fallen.

Die so bestimmten Punkte nehmen verschiedene Stellen auf der Curve ein, und vermittelst der Bedingungsgleichungen (21a) und (21e) können die ensprechenden Werthe für ω' berechnet werden; zu diesem Zwecke sind die betreffenden Werthe des Drehungswinkels ψ und des Winkels Θ zu ermitteln bezw. zu messen.

B. Die Schreibfläche wird gedreht, das bewegliche System verschoben.

8. Einleitung. Bei dieser Anordnung der Versuche wird das untere Ende des Muskels und alle Theile des damit vereinigten beweglichen Systems zu jeder Zeit mit derselben Geschwindigkeit in verticaler Richtung bewegt; in Folge dessen kann der Arm, der die Schreibspitze trägt, jede beliebige Lage im Verhältniss zur Schreibfläche haben. In Folgendem wird jedoch von einem bestimmten Schreibarm gesprochen, und — in Uebereinstimmung mit dem, was oben (in Abtheil. II, Zusatz) in Beziehung auf den Zusammenhang eines drehbaren und eines verschobenen Systems gesagt wurde — wird damit eine ideale gerade Linie gemeint, die von der Schreibspitze in horizontaler Richtung ausgeht; bei der Ausführung der Versuche liegt dieser Schreibarm in der Schreibfläche mit der Schreibspitze auf dem Durchmesser der Fläche, der zur Zeit die verticale Lage hat. In Fig. 5, welche die geometrischen Verhältnisse bei dieser Anordnung der Versuche darstellt, und wo die Bezeichnungen dieselbe Bedeutung wie in der Fig. 4 haben, ist die ausgezogene Gerade ϱ der Schreibarm in der Anfangslage mit der Schreibspitze im Punkte t_1 des Anfangskreises (S_0); und die Gerade ϱ' bezeichnet den Schreibarm zu einer späteren Zeit t, wenn die Schreibspitze in Folge der Verkürzung des Muskels im Curvenpunkte xy, auf dem Radius Vector S sich befindet, der zur selben Zeit t die verticale Lage hat; in dieser Lage ϱ' ist der Schreibarm eine Tangente des Kreises (S), der den Radius Vector S als Halbmesser hat.

Wenn bei der Ausführung des Versuches keine Zuckung des Mus-

kels erfolgt ist, so ist der Schreibarm zur Zeit t eine Tangente des Anfangskreises (S_0) in dem Punkte, wo dieser Kreis den Radius Vector S schneidet, weil die letztgenannte Gerade zur selben Zeit t vertical gestellt ist; zugleich ist der Schreibarm in dieser Lage parallel mit der Secundärlage ϱ', weil derselbe in beiden Lagen senkrecht gegen den Radius Vector S steht. Die punktirte Gerade ϱ in der Fig. 5 deutet diese Lage des Schreibarmes an. In Folge dieser Verhältnisse wird die Zeit t gemessen von dem Winkel α, den der Radius Vector S des Curvenpunktes xy mit einem beliebigen Halbmesser des Anfangskreises macht; als Ausgangslinie für Messung dieses Winkels α nehmen wir hier, wie im vorigen Falle A, den Halbmesser S_0 nach dem Punkte t_1.

Das Coordinatensystem ist so gewählt wie im vorigen Falle A; die x-Axe ist also parallel mit dem Schreibarme ϱ in der Anfangslage, wenn die Schreibspitze im Punkte t_1 des Anfangskreises liegt; und der Winkel α ist auf der Schreibfläche angegeben durch den Winkel, den der Radius Vector S mit der y-Axe macht, so dass:

(22a) $\alpha = \llcorner (y S)$.

Denselben Winkel α macht auch der Schreibarm in der Secundärlage ϱ' mit der negativen x-Axe, wie die Fig. 5 zeigt.

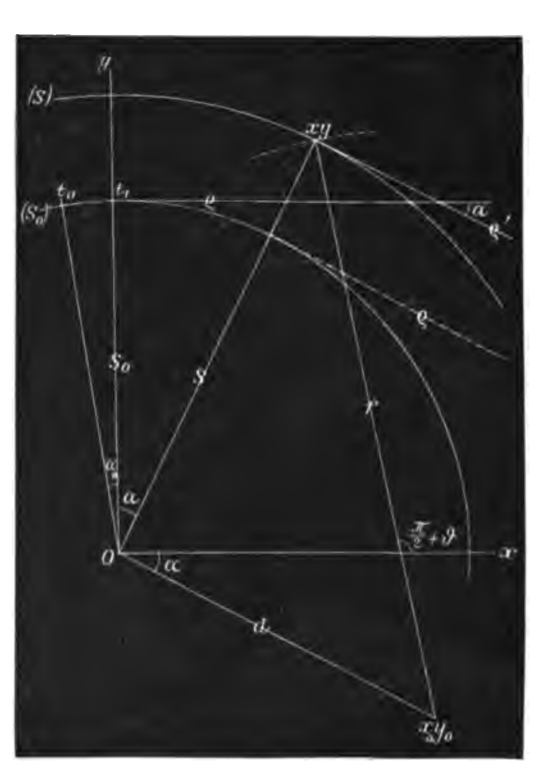


Fig. 5.

Die Verkürzung s des Muskels zur Zeit t ist auf der Schreibfläche angegeben durch die Erhebung der Schreibspitze zur selben Zeit von der Anfangslage, wird also gemessen vom Abstande des Curvenpunktes xy vom Anfangskreise und hat den (schon in der Abtheil. II, Zusatz) genannten Werth:

$$s = S - S_0; \quad \text{wovon:}$$

(22b) $$\frac{ds}{dt} = \frac{dS}{dt} \quad \text{und} \quad \frac{d^2 s}{dt^2} = \frac{d^2 S}{dt^2};$$

hier bezeichnet dS/dt die Geschwindigkeit der Verschiebung des Schreibarmes zur Zeit t und $d^2 S/dt^2$ die Beschleunigung dieser Bewegung.

9. Die Coordinaten des Curvenpunktes xy. Weil der Radius Vector S des Curvenpunktes nach der Gleichung (22a) den Winkel α mit der y-Axe macht, so sind:

(23a) $$\begin{cases} y = S\cos\alpha \\ x = S\sin\alpha. \end{cases}$$

Weil weiter der Schreibarm in der Secundärlage ϱ' den Winkel α mit der negativen x-Axe macht, so hat der Winkel Θ zwischen ϱ' und der Tangente der Curve den Werth:

(23b) $$\Theta = \vartheta + \alpha; \quad \text{wovon:} \quad \vartheta = \Theta - \alpha,$$

wo wieder ϑ den Winkel der Tangente mit der x-Axe bezeichnet.

10. Die Geschwindigkeit $d\sigma/dt$ längs der Curve im Punkte xy wird, in derselben Weise wie in dieser Abtheil. 4, bestimmt vermittelst der Gleichungen:

(24a) $$\begin{cases} \dfrac{d\sigma}{dt}\sin\vartheta = \dfrac{dy}{dt} = -S o \sin\alpha + \dfrac{dS}{dt}\cos\alpha. \\ \dfrac{d\sigma}{dt}\cos\vartheta = \dfrac{dx}{dt} = S o \cos\alpha + \dfrac{dS}{dt}\sin\alpha. \end{cases}$$

Hiervon werden hergeleitet:

(24b) $$\begin{cases} \dfrac{dy}{dt} : \dfrac{dx}{dt} = \operatorname{tg}\vartheta = \dfrac{-S o \sin\alpha + \dfrac{dS}{dt}\cos\alpha}{S o \cos\alpha + \dfrac{dS}{dt}\sin\alpha}, \\ \left(\dfrac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\dfrac{dx}{dt}\right)^2 = \left(\dfrac{d\sigma}{dt}\right)^2 = S^2 o^2 + \left(\dfrac{dS}{dt}\right)^2 \end{cases}$$

und mit Hülfe der Gleichung (23b):

(24c) $$\begin{cases} \dfrac{d\sigma}{dt}\sin(\vartheta + \alpha) = \dfrac{d\sigma}{dt}\sin\Theta = \dfrac{dS}{dt} \\ \dfrac{d\sigma}{dt}\cos(\vartheta + \alpha) = \dfrac{d\sigma}{dt}\cos\Theta = S o \end{cases}.$$

Aus diesen Gleichungen erfolgen:

(24d) $$\operatorname{tg}(\vartheta + \alpha) = \operatorname{tg}\Theta = \frac{dS}{dt} : S o; \quad \frac{dS}{dt} = S o \operatorname{tg}\Theta; \quad \frac{d\sigma}{dt} = \frac{S o}{\cos\Theta}.$$

Vermittelst der letzten Gleichungen kann die Geschwindigkeit dS/dt, mit welcher zur Zeit t der Schreibarm und das bewegliche System verschoben wird, oder nach der Gleichung (22b), womit die Verkürzung s des Muskels vor sich geht, und ebenso die Geschwindigkeit $d\sigma/dt$, mit welcher die Schreibspitze längs der Curve bewegt wird, berechnet werden, wenn nämlich nebst α und S auch der Winkel Θ gemessen wird.

11. Die Beschleunigung im Curvenpunkte xy. Die allgemeinen Werthe der Normal- und Tangential-Componenten Φ_n und Φ_t der Beschleunigung Φ in den Gleichungen (19a) gelten auch bei dieser Anordnung; und die Componenten der Beschleunigung Φ längs der Axen yx werden hier, wenn wieder μ den Winkel $L(\Phi x)$ bezeichnet:

$$(25)\quad \begin{cases} \Phi \sin\mu = \dfrac{d^2 y}{d t^2} = \left(-So^2 + \dfrac{d^2 S}{d t^2}\right)\cos\alpha - 2o\dfrac{dS}{dt}\sin\alpha. \\ \Phi \cos\mu = \dfrac{d^2 x}{d t^2} = \left(-So^2 + \dfrac{d^2 S}{d t^2}\right)\sin\alpha + 2o\dfrac{dS}{dt}\cos\alpha. \end{cases}$$

12. Das Momentancentrum des Curvenpunktes xy. In derselben Weise wie bei der vorigen Anordnung A (dieser Abtheil. 6) kann auch bei dieser Anordnung die Schreibfläche als in Ruhe seiend, und die Curve als entstanden durch zwei Bewegungen, die die Schreibspitze gleichzeitig ausführt, betrachtet werden; die eine dieser Bewegungen ist ihre wirkliche Bewegung, also die Verschiebung mit der Geschwindigkeit dS/dt in der Richtung der Verticale; die andere ist eine Drehung um die Drehungsaxe der Schreibfläche, mit der constanten Winkelgeschwindigkeit o dieser Fläche, aber in entgegengesetzter Richtung. Diese gleichzeitigen Bewegungen können ersetzt werden von einer einzigen Drehung um eine Axe, die senkrecht gegen die Ebene der Schreibfläche steht. Um den Schnittpunkt dieser Axe mit der genannten Ebene zu finden, wird vom Mittelpunkte O (in der Fig. 5) eine Gerade parallel mit dem Schreibarme in der Secundärlage ϱ' gezogen, und auf dieser Geraden vom Mittelpunkte O eine Länge d, bestimmt durch die Gleichung:

$$(26a)\qquad d \times d\alpha = dS;\quad \text{wovon}\quad d \times o = \frac{dS}{dt},$$

abgeschnitten. Der so bestimmte Punkt, der in der Fig. 5 mit $x_0 y_0$ bezeichnet ist, verbleibt bei einer elementaren Drehung oder während des Zeitelementes dt in Ruhe, weil seine Verschiebung dS und die gleichzeitige Drehung $d \times d\alpha$ einander gleich sind, aber nach ent-

gegengesetzten Richtungen geschehen; dieser Punkt ist daher das Momentancentrum des Curvenpunktes xy.

Die letzte Gleichung giebt, mit Hülfe des Werthes für:

$$\frac{1}{o}\,\frac{dS}{dt}$$

in den Gleichungen (24d):

(26b) $$d = \frac{1}{o}\,\frac{dS}{dt} = S \operatorname{tg} \Theta.$$

Die geometrische Bedeutung dieser Gleichung geht hervor, wenn der Curvenpunkt xy und das Momentancentrum $x_0 y_0$ (in Fig. 5) vermittelst einer Geraden f verbunden werden; dann bilden die Geraden f, S und d ein rechtwinkliges Dreieck, in welchem f die Hypothenuse ist; die Gleichung besagt hiermit, dass der spitze Winkel $\llcorner\,(fS)$, der gegen die Seite d steht, den Werth:

$$\llcorner\,(fS) = \Theta$$

hat; der Winkel, den f mit der x-Axe macht, hat daher den Werth

$$\left(\frac{\pi}{2} - \alpha + \Theta\right),$$

oder nach der Gleichung (23b) $(\pi / 2 + \vartheta)$; die Gerade f ist also die Normale der Curve, weil ϑ der Winkel der Tangente mit der x-Axe ist. Dies Resultat leuchtet übrigens schon aus den Ursachen ein, von welchen bei Behandlung der analogen Frage der vorigen Versuchsanordnung (diese Abtheil. 6) die Rede war.

Das eben genannte Dreieck giebt weiter:

(26c) $$\left\{\begin{aligned} & f^2 = S^2 + d^2 = S^2 + \frac{1}{o^2}\left(\frac{dS}{dt}\right)^2; \\ & \text{oder:} \\ & f^2 o^2 = S^2 o^2 + \left(\frac{dS}{dt}\right)^2 = \left(\frac{d\sigma}{dt}\right)^2, \end{aligned}\right.$$

wo die letzte Gleichung aus dem Werthe für $(d\sigma / dt)^2$ in den Gleichungen (24b) hervorgeht; also ist:

(26d) $$f^2\, d\alpha^2 = S^2\, d\alpha^2 + dS^2 = d\sigma^2, \quad \text{und} \quad f\, d\alpha = d\sigma.$$

Die letzten Gleichungen zeigen, dass das Curvenelement $d\sigma$ als entstanden durch eine Drehung um das Momentancentrum $x_0 y_0$ um den Winkel $d\alpha$, und ebenso als die geometrische Summe des Elementes $S\,d\alpha$ des Kreises (S) und des Elementes dS der Verschiebung in der Richtung des Radius Vector S betrachtet werden kann.

13. **Einige bemerkenswerthe Punkte der Curve.** **Der Inflexionspunkt** ϑ_m. Die Untersuchung in dieser Abtheil. 7 zeigte schon, dass in diesem Punkte die Normalcomponente Φ_n den Werth Null hat. Die Bedingungsgleichung, z. B. von der Gleichung (24b) hergeleitet, wird:

(27a) $$S^2 o^2 + 2\left(\frac{dS}{dt}\right)^2 - S\frac{d^2 S}{dt^2} = 0.$$

Der Punkt f_m. Die Gleichung (26c) zeigt, dass in dem Punkte f_m auch $d\sigma/dt$ seinen maximalen Werth $(d\sigma/dt)_m$ annimmt, und die Bedingung, unter allgemeiner Form in dieser Abtheil. 7, für $(d\sigma/dt)_m$ hat schon gelehrt, dass in diesem Punkte die Tangentialcomponente Φ_t gleich Null ist. Die Bedingungsgleichung für f_m und $(d\sigma/dt)_m$ ist von der Gleichung (26c) herzuleiten und wird:

(27b) $$S o^2 + \frac{d^2 S}{dt^2} = 0.$$

Der Punkt Θ_m. Die Bedingungsgleichung vom Werthe für $\operatorname{tg}\Theta$ in den Gleichungen (24d) hergeleitet, ist:

(27c) $$S\frac{d^2 S}{dt^2} - \left(\frac{dS}{dt}\right)^2 = 0.$$

Der Curvengipfel S_m. In diesem Punkte hat der Radius Vector S einen maximalen Werth S_m; in Folge dessen und in Folge der Gleichungen (24d) sind:

(27d) $$\frac{dS}{dt} = 0; \quad \Theta = 0; \quad \frac{d\sigma}{dt} = So = S_m o.$$

C. Die Schreibfläche wird verschoben, das bewegliche System gedreht.

14. **Einleitung.** Die Fig. 1 (in Abtheil. II. 2) stellt die geometrischen Verhältnisse bei dieser Anordnung dar; wir berechnen auch hier die Zeit vom Augenblicke des Anfanges der Zuckung, also vom Punkte t_1 auf der Horizontallinie $t_0 p$; diese Horizontallinie nehmen wir zur Abscissenaxe in einem rechtwinkligen Axensystem xy, dessen Anfangspunkt im Punkte t_1 gelegen sei. Die dem Curvenpunkte xy entsprechende Zeit t wird dann — in Uebereinstimmung mit dem, was an der genannten Stelle gesagt wurde — von der Linie $t_1 p$ bestimmt, die den Werth ct hat, wo c die Geschwindigkeit, mit welcher die Schreibfläche verschoben wird, ist.

15. **Die Coordinaten** des Curvenpunktes xy haben, wie die Fig. 1 zeigt, die Werthe:

$$\text{(28a)} \quad \begin{cases} y = \varrho \sin \psi, \\ x = ct + \varrho(1 - \cos \psi). \end{cases}$$

Weiter ist der Winkel Θ zwischen dem Schreibarme in der Secundärlage ϱ' und der Tangente im Curvenpunkte xy bestimmt durch die Gleichung:

$$\text{(28b)} \qquad \Theta = \vartheta + \psi; \quad \text{wovon:} \quad \vartheta = \Theta - \psi,$$

wo ϑ und ψ dieselbe Bedeutung haben wie oben.

16. Die Geschwindigkeit $d\sigma / dt$ längs der Curve und die Winkelgeschwindigkeit ω im Punkte xy. In derselben Weise wie oben bei Behandlung der analogen Fälle sind hier:

$$\text{(29a)} \quad \begin{cases} \frac{d\sigma}{dt} \sin \vartheta = \frac{dy}{dt} = \varrho \omega \cos \psi \\ \frac{d\sigma}{dt} \cos \vartheta = \frac{dx}{dt} = c + \varrho \omega \sin \psi \end{cases}.$$

Hiervon werden hergeleitet:

$$\text{(29b)} \quad \begin{cases} \operatorname{tg} \vartheta = \frac{\varrho \omega \cos \psi}{c + \varrho \omega \sin \psi} \\ \left(\frac{d\sigma}{dt}\right)^2 = c^2 + 2c\varrho\omega \sin \psi + \varrho^2 \omega^2 \end{cases},$$

und mit Hülfe der Gleichung (28b):

$$\text{(29c)} \quad \begin{cases} \frac{d\sigma}{dt} \sin(\vartheta + \psi) = \frac{d\sigma}{dt} \sin \Theta = c \sin \psi + \varrho \omega \\ \frac{d\sigma}{dt} \cos(\vartheta + \psi) = \frac{d\sigma}{dt} \cos \Theta = \quad c \cos \psi \\ \operatorname{tg}(\vartheta + \psi) = \operatorname{tg} \Theta = \frac{c \sin \psi + \varrho \omega}{c \cos \psi} \end{cases},$$

und hiervon:

$$\text{(29d)} \quad \begin{cases} \omega = \frac{c}{\varrho} \, \frac{\sin(\Theta - \psi)}{\cos \Theta} \\ \frac{d\sigma}{dt} = \frac{c \cos \psi}{\cos \Theta} \end{cases}$$

Vermittelst der letzten beiden Gleichungen kann die Winkelgeschwindigkeit ω und die Geschwindigkeit $d\sigma / dt$ längs der Curve im Punkte xy berechnet werden, wenn die Werthe für ψ und Θ gemessen sind.

17. Die Beschleunigung Φ im Punkte xy. Die Normal- und Tangentialcomponenten Φ_n und Φ_t der Beschleunigung Φ sind in den Gleichungen (19a) unter allgemeinen Formen angegeben; und die

Componenten derselben längs den Axen, von den Gleichungen (29a) hergeleitet, sind:

$$(30)\quad \begin{cases} \Phi \sin \mu = \dfrac{d^2 y}{d t^2} = \varrho\,[\omega' \cos \psi - \omega^2 \sin \psi] \\[2ex] \Phi \cos \mu = \dfrac{d^2 x}{d t^2} = \varrho\,[\omega' \sin \psi + \omega^2 \cos \psi], \end{cases}$$

wo wieder μ den Winkel $\llcorner\,(\Phi x)$ bezeichnet.

18. Das Momentancentrum des Punktes xy. Die beiden Bewegungen, welche die Muskelcurve geben, die Drehung des beweglichen Systems oder des Schreibarmes ϱ mit der Winkelgeschwindigkeit ω und die Verschiebung der Schreibfläche in horizontaler Richtung mit der Geschwindigkeit c, können auch bei dieser Versuchs-

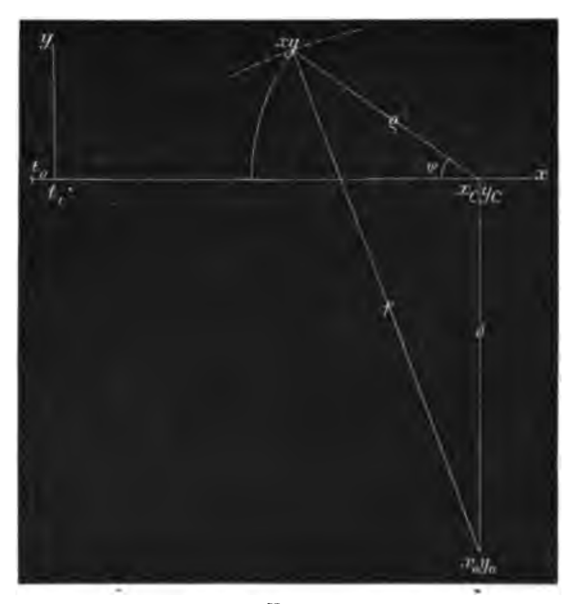


Fig. 6.

anordnung als durch eine einzige Drehung ersetzt gedacht werden, ohne dass die Curve verändert wird. Zu diesem Zwecke ist anzunehmen, dass dem zusammengesetzten Systeme, das vom Schreibarme ϱ (nebst den damit vereinigten Theilen) und der Schreibfläche gebildet wird, eine Verschiebung in horizontaler Richtung mit der Geschwindigkeit c der Schreibfläche, aber in entgegengesetzter Richtung, mitgetheilt wird. Dann ist die Schreibfläche als ruhend zu betrachten, und die Muskelcurve von den zwei Bewegungen, die der Schreibarm

unter diesen Verhältnissen ausführt, herzuleiten. Um die letztgenannten Bewegungen zu summiren, sei in Fig. 6 durch den Drehungspunkt $x_c y_c$ des Schreibarmes in der Ebene der Schreibfläche eine senkrechte Linie gezogen. Jeder Punkt dieser Linie wird in Folge der Verschiebung während des Zeitelementes dt in der Richtung der Abscissenaxe x eine Strecke $c\,dt$ verschoben; und in Folge der Drehung des Schreibarmes um den Punkt $x_c y_c$ wird jede Hälfte dieser Linie, vom letztgenannten Punkte gerechnet, nach entgegengesetzter Richtung gedreht. Bezeichnet daher δ den Abstand eines Punktes dieser Linie vom Drehungspunkte $x_c y_c$, so ist die Verschiebung dieses Punktes in Folge der Drehung $\delta \times d\psi$, weil $d\psi$ die Drehung des Schreibarmes während der Zeit dt ist; auf der einen der beiden Hälften dieser Linie findet sich daher ein Punkt, für welchen die beiden Bewegungen einander gleich, aber entgegengesetzt sind, also:

(31 a) $$c\,dt = \delta . d\psi; \quad \text{oder:} \quad \delta\omega = c; \quad \delta = \frac{c}{\omega};$$

dieser Punkt, in der Fig. 6 mit $x_0 y_0$ bezeichnet, ist das Momentancentrum des Punktes xy der Curve.

Der Abstand f des so bestimmten Punktes $x_0 y_0$ vom Punkte xy hat den Werth:

(31 b) $$f^2 = \varrho^2 + \delta^2 - 2\varrho\delta \cos\left(\frac{\pi}{2} + \psi\right) = \varrho^2 + \frac{c^2}{\omega^2} + \frac{2c\varrho}{\omega}\sin\psi,$$

wovon vermittelst der Gleichung (29 b):

(31 c) $$\left\{\begin{array}{l} f^2\omega^2 = c^2 + 2c\varrho\sin\psi + \varrho^2\omega^2 = \left(\dfrac{d\sigma}{dt}\right)^2; \\ \text{also:} \\ f\omega = \dfrac{d\sigma}{dt}; \quad \text{und:} \quad f\,d\psi = d\sigma; \end{array}\right.$$

das Curvenelement $d\sigma$ kann also betrachtet werden als entstanden durch eine Drehung $d\psi$ um das Momentancentrum $x_0 y_0$.

Nach dem, was über die analogen Fälle — in dieser Abtheil. 6 und 12 — gesagt wurde, versteht sich schon, dass die so, der Grösse nach, bestimmte Linie f die Normale der Curve im Punkte xy ist; dass dem so ist, zeigt auch das von den Geraden f, ϱ und δ gebildete Dreieck; hieraus geht nämlich, mit Hülfe der Gleichungen (31 a), (31 c) und (29 d) hervor:

$$\sin \llcorner (f\varrho) = \frac{\delta}{f}\sin\left(\frac{\pi}{2} + \psi\right) = \frac{c\cos\psi}{\dfrac{d\sigma}{dt}} = \cos\Theta = \sin\left(\frac{\pi}{2} - \Theta\right),$$

d. h. $$\llcorner (f\varrho) = \frac{\pi}{2} - \Theta;$$

der Winkel $\llcorner(f\delta)$ hat daher den Werth:

$$\llcorner(f\delta) = \pi - \left(\frac{\pi}{2} + \psi + \frac{\pi}{2} - \Theta\right) = \Theta - \psi = \vartheta,$$

wo die letzte Gleicheit die Gleichung (28b) ist; also ist:

$$\llcorner(fx) = \frac{\pi}{2} + \vartheta,$$

und dies ist der Winkel, den die Normale mit der x-Axe bildet, weil ϑ der Winkel der Tangente mit derselben Axe ist.

19. Einige bemerkenswerthe Punkte der Curve.

Der Inflexionspunkt ϑ_m. In Folge der allgemeinen Beziehungen, von welchen oben — diese Abtheil. 7 — die Rede war, ist auch bei dieser Anordnung in einem Inflexionspunkte der Winkel ϑ ein Maximum oder Minimum und der Normalcomponente Φ_n der Beschleunigung gleich Null. Die Bedingungsgleichung dieses Punktes kann vom Werthe für $\operatorname{tg}\vartheta$ in der Gleichung (29b) hergeleitet werden und unter die Form:

(32a) $$\omega' = \omega^2 \operatorname{tg}\Theta$$

gebracht werden.

Der Punkt f_m. Die Bedingungsgleichung dieses Punktes

(32b) $$\omega' = \omega^2 \operatorname{tg}\vartheta = \omega^2 \operatorname{tg}(\Theta - \psi)$$

geht aus (31b) hervor.

Der Punkt Θ_m. In diesem Punkte ist:

(32c) $$\omega' = -\frac{\omega^2}{\operatorname{tg}\vartheta} = -\omega^2 \operatorname{cotg}(\Theta - \psi),$$

welche Gleichung aus dem Werthe für $\operatorname{tg}\Theta$ in der Gleichung (29c) folgt.

Der Punkt $(d\sigma/dt)_m$. In diesem Punkte ist die Tangentialcomponente Φ_t der Beschleunigung Φ gleich Null, wie oben — diese Abtheil. 7 — gefunden wurde, und

(32d) $$\omega' = -\omega^2 \operatorname{cotg}\Theta;$$

diese Gleichung folgt aus dem Werthe für $(d\sigma/dt)^2$ in der Gleichung (29b).

Der Curvengipfel ψ_m. In diesem Punkte nimmt auch die Ordinate y einen maximalen Werth y_m; in den Gleichungen (29a) ist daher:

(32e) $$\frac{dy}{dt} = 0; \quad \text{also:} \quad \omega = 0,$$

und daher von den Gleichungen (29b):

(32f) $$\vartheta = 0, \quad \text{und} \quad \frac{d\sigma}{dt} = c.$$

In den Punkten: ϑ_m, f_m, Θ_m und $(d\sigma/dt)_m$ kann also die Winkelbeschleunigung ω' vermittelst der Gleichungen (32a) ... (32d) berechnet werden, wenn die Lage dieser Punkte (α, ψ) und zugleich der Winkel Θ bestimmt ist.

D. Die Schreibfläche und das bewegliche System werden beide verschoben.

20. Einleitung. Die Verhältnisse bei dieser Versuchsanordnung zeigt die nachstehende Fig. 7, wo die Bezeichnungen dieselbe Bedeutung wie im vorigen Falle haben.

21. Die Coordinaten und die Tangente des Curvenpunktes xy. Wie schon in Abtheil. II, Zusatz, hervorgehoben wurde, haben die Coordinaten xy die Werthe:



Fig. 7.

(33a) $$\begin{cases} y = s \\ x = ct \end{cases},$$

wo s die Verkürzung des Muskels bedeutet. Weil weiter der Schreibarm in jeder Secundärlage der x-Axe parallel ist, so wird

(33b) $$\Theta = \vartheta.$$

22. Die Geschwindigkeit $d\sigma/dt$ längs der Curve im Punkte xy. Die Componenten der Geschwindigkeit $d\sigma/dt$ bekommen hier in Folge der Gleichungen (33a) die Werthe:

(34a) $$\begin{cases} \frac{d\sigma}{dt}\sin\vartheta = \frac{dy}{dt} = \frac{ds}{dt} \\ \frac{d\sigma}{dt}\cos\vartheta = \frac{dx}{dt} = c \end{cases},$$

wovon:

(34b) $$\frac{dy}{dt} : \frac{dx}{dt} = \frac{dy}{dx} = \operatorname{tg}\vartheta = \frac{1}{c}\,\frac{dy}{dt}; \quad \text{und} \quad \left(\frac{d\sigma}{dt}\right)^2 = c^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2;$$

aus diesen Gleichungen folgt weiter:

(34c) $$dx = c\,dt; \quad \text{also:} \quad \frac{d^2y}{dx^2} = \frac{1}{c^2}\,\frac{d^2y}{dt^2}.$$

23. Die Beschleunigung Φ im Punkte xy wird bestimmt durch die Gleichungen:

$$(35\text{a})\quad \begin{cases} \Phi \sin \mu = \dfrac{d^2 y}{d t^2} = \dfrac{d^2 s}{d t^2} \\ \Phi \cos \mu = \dfrac{d^2 x}{d t^2} = 0, \end{cases}$$

von welchen die letzte Gleichung giebt:

$$(35\text{b})\qquad \cos \mu = 0; \quad \mu = \frac{\pi}{2}; \quad \text{also:} \quad \Phi = \frac{d^2 y}{d t^2} = \frac{d^2 s}{d t^2},$$

d. h. die Beschleunigung Φ wirkt in jedem Curvenpunkte in der Richtung der Ordinate oder der Verticale. Die allgemeinen Gleichungen (19b) für die Tangential- und Normalcomponenten Φ_t und Φ_n werden also hier:

$$(35\text{c})\quad \begin{cases} \Phi_t = \Phi \cos(\mu - \vartheta) = \Phi \cos\left(\dfrac{\pi}{2} - \vartheta\right) = \Phi \sin \vartheta = \dfrac{d^2 y}{d t^2} \sin \vartheta \\ \Phi_n = \Phi \sin(\mu - \vartheta) = \Phi \sin\left(\dfrac{\pi}{2} - \vartheta\right) = \Phi \cos \vartheta = \dfrac{d^2 y}{d t^2} \cos \vartheta. \end{cases}$$

Das Momentancentrum liegt bei dieser Ordnung der Versuche in unendlicher Entfernung, d. h. es giebt hier keinen solchen Punkt.

24. Einige bemerkenswerthe Punkte der Curve. In einem Inflexionspunkte ist — wie in dieser Abtheil. 7 hervorgehoben wurde — die Normalcomponente Φ_n der Beschleunigung gleich Null, und der Tangentenwinkel ϑ hat einen maximalen (oder minimalen) Werth ϑ_m, also hat hier nach der Gleichung (33b) auch der Winkel Θ einen solchen Werth Θ_m; die Curvenpunkte ϑ_m und Θ_m fallen also bei dieser Anordnung zusammen. Weil weiter in einem solchen Punkte Φ_n den Werth Null hat, so sind in den Gleichungen (35c):

$$(36\text{a})\qquad \Phi_n = 0; \quad \frac{d^2 y}{d t^2} = 0; \quad \text{und daher:} \quad \Phi_t = 0;$$

der andere Faktor, $\cos \vartheta$, im Werthe für Φ_n kann nämlich nicht gleich Null sein, weil der Winkel ϑ nicht ein rechter Winkel ist. Da also auch die Tangentialcomponente Φ_t in diesem Punkte ϑ_m den Werth Null hat, so fällt — nach dem, was in dieser Abtheil. 7 vom Punkte $(d\sigma / dt)_m$ gesagt wurde — auch der letztgenannte Punkt mit dem Punkte ϑ_m zusammen. Weil weiter in dem Punkte ϑ_m der Coëfficient $d^2 y / d t^2$ gleich Null ist, so hat hier auch die Geschwindigkeit dy / dt längs der y-Axe den Werth $(dy / dt)_m$.

Die Curvenpunkte ϑ_m, Θ_m und $(d\sigma / dt)_m$, die in den oben behandelten Fällen verschiedene Stellen auf den Curven einnehmen, fallen

also bei dieser Anordnung in demselben Punkte zusammen. Im betreffenden Punkte verändert weiter $d^2 y / d x^2$, und also auch $d^2 y / d t^2$ sein Zeichen; dasselbe macht auch die Beschleunigung Φ in Folge der Gleichung (35 b).

Nach der Gleichung (36 a) ist die Bedingungsgleichung dieses Punktes ϑ_m von der Geschwindigkeit c der Schreibfläche unabhängig, d. h. dieser Punkt tritt zu derselben Zeit ein, welche Geschwindigkeit die Schreibfläche auch haben mag, und hängt nur davon ab, wie der Muskel sich contrahirt. Bei den oben behandelten Fällen A, B und C hängt dagegen die Lage dieses Punktes nach den Gleichungen (21 a), (27 a) und (32 a) von der Geschwindigkeit der Schreibfläche o bezw. c ab, und zugleich im Falle A von der Länge des Schreibarmes ϱ und der des Halbmessers S_0 des Anfangskreises (weil ζ und Θ davon abhängig sind), im Falle B vom Radius Vector S, also auch vom Abstande vom Mittelpunkte O der Schreibfläche, und im Falle C vom Schreibarme ϱ.

Der Curvengipfel ψ_m; in diesem Punkte nimmt die Ordinate y einen maximalen Werth y_m an; die Gleichungen (34 a) geben daher:

(36 b) $$\frac{dy}{dt} = \frac{ds}{dt} = 0; \quad \vartheta = 0, \quad \text{und} \quad \frac{d\sigma}{dt} = c.$$

Zusatz. Noch ein Umstand in dieser Frage mag hier berücksichtigt werden; wie in der Abtheilung I Gleichung (2) gefunden wurde, wird bei dieser Anordnung die Muskelkraft Q von der Gleichung:

$$Q = Mg + M\frac{d^2 y}{d t^2}$$

bestimmt, weil hier die Ordinate y gleich der Verkürzung s ist. Hieraus geht hervor, dass Q grösser als Mg von der Anfangslage bis zum Inflexionspunkte ϑ_m ist, wo sie den Anfangswerth Q_1 wieder annimmt, weil in diesem Intervalle $d^2 y / d t^2$ positiv ist und im Punkte ϑ_m den Werth Null annimmt. Vom Punkte ϑ_m gegen den Curvengipfel hat $d^2 y / d t^2$ negativen Werth und Q ist also kleiner als Mg oder Q_1 in der Anfangslage des Systems.

Schon im Jahre 1850, beim Verzeichnen der ersten Muskelcurven, wurden bekanntlich diese Verhältnisse der Muskelkraft von v. Helmholtz erkannt; die Curven waren nämlich nach dieser Methode D gezeichnet,[1] und die erwähnten Resultate in Bezug auf die Muskelkraft

[1] Zwar war die Schreibfläche nicht eben, sondern ein um ihre in verticaler Richtung gestellte Axe rotirender Cylinder; bei solcher Anordnung wird jedoch die Curve gleich der auf einer ebenen Schreibfläche gezeichneten, weil die Schreibspitze, während der Verkürzung des Muskels, in jeder Lage auf derselben Verticale verbleibt.



gingen unmittelbar bei Betrachtung der Curven hervor, weil diese Curven im Anfange ihre convexe, sodann ihre concave Seite gegen die Abscissenaxe wenden, und daher der Coëfficient $d^2 y / dx^2$, und also auch $d^2 y / dt^2$ — der bei dieser Anordnung dem vorigen proportional ist — in jenem Theile der Curve positives, in diesem negatives Zeichen und an der Uebergangsstelle, im Inflexionspunkte, den Werth Null hat.

Der Inflexionspunkt ϑ_m und der Curvenpunkt, wo die Muskelkraft Q ihren anfänglichen Werth Q_1 wieder annimmt, fallen also bei dieser Anordnung D zusammen, weil die Bedingungsgleichungen für beide Punkte dieselben sind; bei den Anordnungen A, B und C dagegen nehmen beide Punkte verschiedene Stellen auf der Curve ein; im Falle B ist nämlich die Bedingung für Q gleich Q_1 dieselbe wie im Falle D, nämlich die Gleichung (4a), oder nach der Gleichung (22b):

$$\frac{d^2 S}{d t^2} = 0;$$

die Bedingung des Inflexionspunktes aber ist die Gleichung (27a). In den Fällen A und C wieder ist die Gleichung (14b):

$$1 - \cos\psi = \frac{T + T_0}{M g a}\,\omega'$$

die Bedingung für den Punkt, wo Q gleich Q_1 ist; für den Inflexionspunkt aber gelten die Gleichungen (21a) bezw. (32a). — Das bei der Anordnung D gefundene Verhältniss der Muskelkraft ist also nicht eine allgemeine Eigenschaft der Muskelkurven, wie oft und auch bei Versuchen die Muskelcurven zu analysiren angenommen ist.

IV. Die Apparate und die Messungen.

In Bezug auf die Apparate, die für die hier vorliegenden Aufgaben zur Anwendung gekommen sind, und in Bezug auf die Ausführung der Messungen verweisen wir auf die von Dr. Clopatt gegebene Darstellung;[1] nur einige Veränderungen in den Apparaten, die, seitdem Dr. Clopatt seine Untersuchungen ausführte, vorgenommen sind, mögen hier kurz berührt werden.

Die Unterlage, auf welcher die Glasscheibe im Apparate für Ausführung der Messnngen ruht, hindert an einigen Stellen die Beleuchtung im Mikroskope bei der Messung des Winkels ψ. Um die Messungen auch in diesem Gebiete in Continuität mit dem bestimmten Winkelintervalle $\Delta\alpha$ fortsetzen zu können, ist das erwähnte Mikroskop

[1] A. Clopatt, *Dies Archiv.* Bd. X. S. 250 bis 257.

mit einem von Herrn Optiker C. Zeiss in Jena verfertigten Vertical-Illuminator versehen.

Weiter sind im Rotationsapparate unter der Drehungsaxe, nahe dem Ende der Axe, wo die Glasscheibe befestigt wird, Frictionsrollen angebracht; das andere Ende der Axe bewegt sich um eine Spitze.

V. Bestimmung der Constanten.

Als Maasseinheiten wenden wir im Folgenden Centimeter, Gramm und Secunden an; um grosse Zahlen zu vermeiden, geben wir jedoch die Arbeit einer Kraft (z. B. die der Muskelkraft) nicht in Erg an, sondern in $g \times$ Erg, also in Gramm-Centimeter, und eine Kraft (z. B. die Muskelkraft) nicht in Dyn, sondern in $g \times$ Dyn, also in Gramm, wo g, wie in der Abtheil. I., die Beschleunigung in Folge der Schwere ist, und an diesem Orte (Helsingfors) den Werth $981 \cdot 9^{\text{cm}}$ hat.

Bei Ausführung von Curvenanalysen müssen nach der vorigen Darstellung folgende Constanten bekannt sein oder bestimmt werden: die Winkelgeschwindigkeit o der Schreibfläche, der Halbmesser S_0 des Anfangskreises der Muskelcurve, die Länge ϱ des Schreibarmes, die Halbmesser R und r der Rollen, von welchen in Abtheil. I. 7 und I. 6 die Rede war, das Trägheitsmoment T und das Drehungsmoment Ma (in der Anfangslage des Systems) der mit der Drehungsaxe unbeweglich vereinigten Theile, schliesslich das Trägheitsmoment T_0 und das Moment mr des Lothes.

1. Die Winkelgeschwindigkeit o der Schreibfläche wird bestimmt vermittelst einer Stimmgabelcurve; zu diesem Zwecke wird der Winkel α^0, der einer gewissen Anzahl n (z. B. 20 Stück) von Wellenlängen der Stimmgabelcurve unter der Muskelcurve entspricht, an der Scala für Messung des Winkels α gemessen. Für die Berechnung ist dann:

$$\alpha^0 = o\,t; \quad \text{also:} \quad o = \frac{\alpha^0}{t}; \quad t = n\tau,$$

wo τ die (ganze) Periode der Stimmgabel ist, und in unseren Versuchen den Werth $\frac{1}{128}$ Secunde hat; also ist:

$$\text{(A)} \qquad o = \frac{\alpha^0}{n \times \frac{1}{128}}.$$

Hier ist α^0 ursprünglich in Winkelgraden und Minuten angegeben, muss aber bei den Anwendungen in linearem Maasse, also in Centimetern, ausgedrückt werden, um auch die Winkelgeschwindigkeit o in Centimetern zu messen.

Bezeichnet weiter $\varDelta\alpha$ das Intervall, für welches die Messungen ausgeführt sind, und $\varDelta t$ die entsprechende Zeit, so ist:

$$\text{(B)} \qquad \varDelta\alpha = o\,\varDelta t, \quad \text{und:} \quad \varDelta t = \frac{\varDelta\alpha}{o},$$

eine Gleichung, die bei Ausführung der Interpolationen immer zur Anwendung kommt; auch $\varDelta\alpha$ muss, wie α^0, in Bogenlänge für den Halbmesser 1 Centimeter ausgedrückt werden.

2. Der Schreibarm ϱ muss in allen drehbaren beweglichen Systemen genau denselben Werth, 20 cm, haben, wie der Arm im Messungsapparate, der das Mikroskop für Messung des Winkels ψ trägt.

3. Der Halbmesser S_0 des Anfangskreises wird abgelesen an der Scala, die am Schlitten des Messungsapparates befestigt ist, und wird angegeben in Centimetern und $\frac{1}{1000}$ Theilen vom Centimeter.

4. Die Halbmesser R und r der Rollen im beweglichen Systeme können berechnet werden vom Umfange $2\pi R$ bezw. $2\pi r$ der Rolle in der Tiefe der Furche, längs welcher der zu der Rolle gehörige Draht bewegt wird; diese Umfänge können mit einem feinen Drahte (z. B. geglühtem Eisendrahte) gemessen werden.

5. Das Trägheitsmoment T und das Moment Ma, der mit der Drehungsaxe unbeweglich vereinigten Theile können vermittelst eines Pendelversuches und einer Wägung bestimmt werden. Für Ausführung des Pendelversuches wird dem Myographion eine solche Lage gegeben, dass das bewegliche System nach unten hängt und dessen Drehungsaxe horizontal gestellt ist. Hat das Moment Ma einen so grossen Werth, dass das System in dieser Lage eine Reihe von kleinen Schwingungen macht, so ist die Anzahl derselben während bestimmter Zeit zu beobachten, um davon die (ganze) Pendelperiode τ des Systems zu berechnen, dann ist:

$$\text{(C)} \qquad \frac{T}{Mga} = \left(\frac{\tau}{2\pi}\right)^2; \quad \text{oder:} \quad \frac{T}{g} = \left[\frac{\tau}{2\pi}\right]^2 \cdot Ma.$$

Weiter ist das Massenmoment Ma durch Wägen zu bestimmen, und daraus der Werth T/g nach Gleichung (C) zu berechnen. Nachdem dem Myographion die gewöhnliche Lage gegeben ist, geschieht wohl dieses Wägen am bequemsten und sichersten vermittelst laufender Gewichte, eines grösseren, das, nahe der Drehungsaxe gestellt, dem Schreibarme eine beinahe horizontale Lage giebt, und eines kleineren (etwa 1 bis 5 g), womit die letztgenannte Lage vollständig hergestellt wird. Zu diesem Zwecke werden die Gewichte mit Coconfäden versehen, um an den Arm des Systems, der die Schreibspitze trägt, oder an dessen Fortsetzung auf der anderen Seite der Drehungsaxe

gehängt werden zu können; weiter ist der erwähnte Arm mit einem Strich für jeden Centimeter, gerechnet von der (idealen) Drehungsaxe, versehen, um die Länge der Momentarme der Gewichte ablesen zu können; nur für das kleine laufende Gewicht ist dann eine Messung des Armes zwischen zwei naheliegenden Centimeterstrichen auszuführen. Einige Versuche, in dieser Weise ausgeführt, geben für das gesuchte Moment Ma in kurzer Zeit übereinstimmende Werthe.

Ist aber a und also das Moment Ma gleich Null, so dass das System in jeder Lage in Ruhe verbleibt — was bei der Anordnung A. b in Abtheil. I. 12 der Fall ist —, oder ist das Moment so klein, dass das System zu wenig Schwingungen macht, um die Pendelperiode desselben bestimmen zu können, so muss das Verfahren abgeändert werden. Nach den oben erwähnten Principien haben wir dann folgendes Verfahren angewandt: das System wird mit einem (Messing-) Stabe belastet, der die Form eines rechtwinkligen Prismas und an dem einen Ende ein cylindrisches Loch hat, um genau an der Axe des Systems vermittelst einer Mutter befestigt zu werden (zum letztgenannten Zwecke dient die kleine Rolle mit dem Halbmesser r, an welcher das Loth mg hängt, wovon in Abtheil. I. 6 die Rede war). Dieser Stab hat eine Länge l von genau 22^{cm}; seine Breite, Dicke und Masse seien bezw. b, c und μ. Das cylindrische Loch steht senkrecht gegen die Flächen lb und hat also c zur Höhe; der Mittelpunkt seiner kreisförmigen Basis liegt auf 1 und 21^{cm} von den Enden des Stabes, und seine Axe liegt in gleichem Abstande von den Flächen lc. Der Stab wird so befestigt, dass seine Richtung parallel mit dem Schreibarme ϱ ist, und dass also die Massenmittelpunkte des beweglichen Systems und des Stabes in derselben Ebene durch die Drehungsaxe liegen. Für die Pendelbewegung des in solcher Weise zusammengesetzten Systems gilt dann die Gleichung:

$$\text{(D)} \qquad \frac{T + T'}{[Ma + M'a']g} = \left[\frac{\tau'}{2\pi}\right]^2; \text{ oder: } \frac{T + T'}{g} = \left[\frac{\tau'}{2\pi}\right]^2 (Ma + M'a'),$$

wenn nämlich T' das Trägheitsmoment, $M'a'$ das Drehungsmoment des Stabes und τ' die Pendelperiode des zusammengesetzten Systems bezeichnen. — Diese Periode τ' und das Moment $(Ma + M'a')$ sind hier ganz wie im vorigen Falle zu bestimmen, und dann ist das Trägheitsmoment

$$(T + T') \quad \text{oder} \quad \frac{T + T'}{g}$$

nach der Gleichung (D) zu berechnen.

Sind in solcher Weise die Werthe für $(Ma + M'a')$ und $(T + T')/g$ festgestellt, so sind noch einige Rechnungen nöthig, um von den

Dimensionen und der Masse des Stabes die Grössen $M'a'$ und T'/g und also von den erstgenannten Werthen die Constanten Ma und T/g zu berechnen. Zu diesem Zwecke sei bemerkt, dass das Volumen des cylindrischen Loches $\pi \varrho_1^2 c$ ist, wenn ϱ_1 den Halbmesser seiner Endfläche bezeichnet; das Volumen des Stabes ist also $(l b c - \pi \varrho_1^2 c)$ oder $[l b - \pi \varrho_1^2]c$; weil μ die Masse des Stabes bezeichnet, so ist die Volumeinheit oder die Dichte des Stabes

(Ea) $$= \frac{\mu}{[l b - \pi \varrho_1^2]c}.$$

Hieraus geht hervor, dass, wenn das cylindrische Loch mit derselben Substanz wie der Stab gefüllt wäre, so würde die Masse des cylindrischen Loches

(Eb) $$= \frac{\mu}{[l b - \pi \varrho_1^2)c} \cdot \pi \varrho_1^2 c = \frac{\mu \pi \varrho_1^2}{l b - \pi \varrho_1^2}$$

sein, und also die Masse des Stabes

(Ec) $$= \mu + \frac{\mu \pi \varrho_1^2}{l b - \pi \varrho_1^2} = \frac{\mu l b}{l b - \pi \varrho_1^2}.$$

Mit Hülfe der letzten drei Beziehungen (Ea), (Eb) und (Ec) können die Grössen $M'a'$ und T'/g bestimmt werden. Für die Berechnung der Grösse $M'a'$ bemerken wir, dass bei dem Pendelversuche die beiden obersten Centimeter des Stabes einander equilibriren, weil sie auf entgegengesetzten Seiten der Drehungsaxe gelegen sind, und weil das Loch in deren Mitte symmetrisch im Verhältniss zur Drehungsaxe ist; die Massenmomente in diesen Theilen des Stabes heben daher einander auf. Das Massenmoment $M'a'$ wird also nur von den übrigen Theilen des Stabes, die alle auf derselben Seite der Drehungsaxe gelegen sind und das Volumen $20.bc$ einnehmen, hervorgerufen. Die Masse in diesem Volumen ist also in Folge der Gleichung (Ea):

$$20 b c \cdot \frac{\mu}{(l b - \pi \varrho_1^2)c} \quad \text{oder:} \quad \frac{20 \mu b}{l b - \pi \varrho_1^2};$$

und da der Massenmittelpunkt des Volumens $20.bc$ in einer Entfernung von 11^{cm} von der Drehungsaxe liegt, so ist:

(F) $$M'a' = \frac{20 \mu b}{l b - \pi \varrho_1^2} \cdot 11 = 220 \frac{\mu b}{l b - \pi \varrho_1^2} \text{ g-cm}.$$

Das Trägheitsmoment T' wieder ist gleich dem Trägheitsmomente des Stabes, vermindert um das Trägheitsmoment des Loches, wenn angenommen wird, dass das Loch mit einem Stoffe von derselben Beschaffenheit wie die des Stabes gefüllt ist; alle Trägheitsmomente sind

hier in Beziehung zur Drehungsaxe zu nehmen, und die beiden letzteren haben in Folge der Gleichungen (E b) und (E c) die Werthe:

$$\frac{\mu\, l\, b}{l\, b - \pi\, \varrho_1^2}\left[\frac{l^2 + b^2}{3.4} + 10^2\right] \mathrm{gr(cm)}^2, \quad \text{und:} \quad \frac{\mu\, \pi\, \varrho_1^2}{l\, b - \pi\, \varrho_1^2}\, \frac{\varrho_1^2}{2}\, \mathrm{gr(cm)}^2;$$

wenn das Loch gefüllt ist, liegt nämlich der Massenmittelpunkt des Stabes in einem Abstande von 10^{cm} von der Drehungsaxe; und diese Axe fällt mit der Axe des cylindrischen Loches zusammen. Also ist:

$$\text{(G)} \qquad \frac{T'}{g} = \left[\frac{\mu\, l\, b}{l\, b - \pi\, \varrho_1^2}\left(\frac{l^2 + b^2}{3.4} + 10^2\right) - \frac{\mu\, \pi\, \varrho_1^2}{l\, b - \pi\, \varrho_1^2}\, \frac{\varrho_1^2}{2}\right] \frac{\mathrm{gr\,(cm)}^2}{g}.$$

Hier sei noch bemerkt, dass die auf solche Weise vermittelst Berechnung bestimmten Werthe für $M'a'$ und T'/g durch einen einfachen Pendelversuch controlirt werden können; zu diesem Zwecke ist das Loch mit einem Korke (oder einem anderen leichten Stoffe) zu füllen, und eine feine Nadel durch die Mitte des Korkes zu führen. Um die horizontal gestellte Nadel, die hier dieselbe Lage wie die Drehungsaxe bei dem vorigen Pendelversuche hat, lässt man dann den Stab kleine Pendelschwingungen machen, um die Periode τ'' zu bestimmen; dann ist, weil die Trägheitsmomente des Korkes und der Nadel hier ignorirt werden können,

$$\text{(H)} \qquad \frac{T'}{M'a'g} = \left(\frac{\tau''}{2\,\pi}\right)^2;$$

der so gefundene Werth für $T'/M'a'g'$ kann mit dem von T'/g und $M'a'$ berechneten Werthe verglichen werden.

6. Das Trägheitsmoment T_0 oder T_0/g des Lothes. Das Loth mit der Masse m hat in unseren Versuchen die Form eines geraden Kreiscylinders und ist so gestellt, dass der Draht (zur Rolle mit dem Halbmesser r) mit der Richtung der Cylinderaxe zusammenfällt. Sein Trägheitsmoment in Bezug auf eine Axe, die durch seinen Massenmittelpunkt, parallel mit der Drehungsaxe des beweglichen Systems, geht, ist:

$$\frac{m}{3.4}(3\,\varrho_2^2 + h^2)\, \mathrm{gr\,(cm)}^2,$$

wenn h die Höhe des Cylinders und ϱ_2 der Halbmesser seiner Endfläche ist. Davon, weil dies Loth als gelegen in dem Abstande r von der Drehungsaxe zu betrachten ist:

$$\text{(I)} \qquad \frac{T_0}{g} = \left[\frac{m}{3.4}(3\,\varrho_2^2 + h^2) + m\, r^2\right] \frac{\mathrm{gr\,(cm)}^2}{g}.$$

VI. Bestimmung der Differentialcoëfficienten ω und ω'.

Wie schon in Abtheilung I hervorgehoben wurde, können die Coëfficienten $d\psi / dt$ und $d^2\psi / dt^2$, d. h. die Winkelgeschwindigkeit ω und die Winkelbeschleunigung ω' vermittelst numerischer Interpolation bestimmt werden, wenn der Drehungswinkel ψ für gleiche Zeitintervalle Δt gemessen wird. Hierbei kann die letztgenannte Grösse beliebig gewählt werden; durch Veränderung des Intervalles Δt oder — nach der Gleichung (B) in der vorigen Abtheilung — $\Delta \alpha$ können also die Grössen ω und ω' in einem bestimmten Punkte von verschiedenen Primärbeobachtungen berechnet werden, nur der Werth für ψ in dem betreffenden Punkte wird jedenfalls bei der Berechnung zu Grunde gelegt. Alle diese Werthe, z. B. mit den Intervallen $\Delta \alpha$ gleich 2^0, 4^0, 6^0 oder 8^0, müssen mit einander übereinstimmen.

In der Abtheil. III ergab sich weiter, dass bei der Anordnung A — die einzige, die wir hier berücksichtigen — die Grössen ω und ω' auch von den Werthen, die ψ und Θ im betreffenden Punkte annehmen, und von den Constanten ϱ, S_0 und o der Curve berechnet werden können, nämlich ω für jeden Punkt nach der Gleichung (18g), und ω' zwar nicht für jeden Punkt, aber doch nach den Gleichungen (21a)...(21e) für einige Punkte, die im Allgemeinen verschiedene Stellen auf der Muskelcurve einnehmen. Um die so nach verschiedenen Methoden und mit verschiedenen Primärbeobachtungen gefundenen Werthe für ω und ω' mit einander zu vergleichen, sind die Resultate der Messungen und Berechnungen für eine Curve in der nachstehenden Tab. I zusammengestellt (s. S. 372 und 373).

Die Curve wurde vom Musculus gracilis minor (nach der Benennung von Gaupp in der neuen Auflage von Ecker's Anatomie des Frosches) von einem curarisirten Thiere gezeichnet; die Reizung geschah mit einem Oeffnungsinductionsschlage, der durch die Länge des Muskels geleitet wurde und maximale Zuckung hervorrief. Die Constanten der Curve waren: $\varrho = 20$; $S_0 = 18 \cdot 33$; $o = 4.858$, alle in Centimetern; das Winkelintervall $\Delta \alpha$, für welches die Messungen von ψ und Θ ausgeführt wurden, war ein Grad, wie die erste Columne mit der Ueberschrift α in der Tabelle andeutet, was einer Zeit von 0·0036 Secunde (in abgerundeter Zahl) entspricht; der Werth α ist hier vom Augenblicke t_0, als die Reizung geschah, angegeben; die Zeit t_1 des Anfanges der Zuckung traf $3^0\,21'$, oder im Zeitmaass 0·012 Secunde später ein. In dem beweglichen Systeme war das Massenmoment Ma gleich Null; die Constanten des Systems sind ohne Einfluss für die Berechnungen von ω und ω', und können daher hier

Tabelle I.

α	ψ	ω berechnet von Θ	ω berechnet, verm. Intervall von 2°	4°	6°	Θ beob.	Θ ber. von ω	ω' berechnet, verm. Intervall von 2°	4°	6°	Bemerkungen
6° 49′	0° 3′ 37″	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
7 49	0 6 11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
8 49	0 9 36	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
9 49	0 14 19	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
10 49	0 20 5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
11 49	0 27 19	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
12 49	0 35 30	0·727	0·713	—	—	9° 45′	9° 32′ 10″	—	—	—	
13 49	0 45 22	0·831	0·855	—	—	11 9	11 24 10	35·47	—	—	
14 49	0 56 40	0·986	0·987	—	—	13 10	13 10 30	33·94	32·38	—	
15 49	1 9 32	1·074	1·085	—	—	14 22	14 29 50	28·05	30·80	—	
16 49	1 23 47	1·192	1·195	—	—	15 54	15 56 0	25·06	27·44	—	
17 49	1 38 45	1·276	1·289	—	—	17 2	17 9 0	28·22	25·58	—	
18 49	1 55 25	1·365	1·368	1·343	—	18 12	17 55 20	22·68	19·69	20·63	
19 49	2 12 49	1·463	1·449	1·429	—	19 28	19 5 10	15·27	16·49	16·24	19·61 von f_{min}
20 49	2 30 58	1·484	1·492	1·488	—	19 52	19 54 0	11·18	12·07	11·31	
21 49	2 49 38	1·525	1·524	1·523	—	20 29	20 27 50	6·29	6·30	7·12	
22 49	3 8 32	1·550	1·543	1·537	—	20 55	20 42 30	2·99	2·17	3·02	3·80 von $(\zeta + \psi - \Theta)_{min}$
23 49	3 27 35	1·533	1·539	1·540	—	20 55	20 59 30	− 1·75	− 1·77	− 0·12	
24 49	3 46 37	1·515	1·525	1·529	1·529	20 54	21 2 50	− 7·13	− 5·29	− 4·31	−4·58 von Θ_{max}
25 49	4 5 15	1·500	1·502	1·505	1·510	20 55	21 0 50	− 8·00	− 7·47	− 7·21	
26 49	4 23 33	1·473	—	1·474	1·479	20 48	20 52 30	—	− 9·39	− 9·28	
27 49	4 41 33	1·435	1·436	1·434	1·444	20 35	20 40 10	−10·37	−11·20	−11·03	
28 49	4 59 3	1·401	—	1·391	1·400	20 24	20 21 30	—	−12·24	−12·33	
29 49	5 16 0	1·352	1·347	1·349	1·353	20 3	20 3 10	−14·06	−13·38	−13·25	
30 49	5 32 18	1·306	—	1·299	1·302	19 44	19 39 20	—	−13·97	−13·85	
31 49	5 48 0	1·248	1·245	1·248	1·250	19 18	19 19 10	−14·07	−14·15	−14·41	
32 49	6 3 4	1·195	—	1·195	1·205	18 54	19 0 0	—	−14·65	−14·81	
33 49	6 17 30	1·148	1·144	1·141	1·145	18 34	18 31 40	−15·35	−14·98	−15·16	

34° 49′	6° 31′ 19″	1·083	—	1·088	1·089	18° 2′	18° 4′ 50″	—	−15·46	−15·57	
35 49	6 44 25	1·026	1·020	1·031	1·032	17 35	17 38 50	−14·02	−16·05	−15·99	
36 49	6 56 44	0·966	—	0·974	0·972	17 6	17 9 40	—	−16·35	−16·63	
37 49	7 8 22	0·906	0·911	0·916	0·912	16 36	16 39 30	−16·13	−16·78	−17·15	
38 49	7 19 19	0·872	—	0·849	0·847	16 22	16 6 20	—	−17·97	−18·08	{ − 17·01 von $\left(\frac{d\sigma}{dt}\right)_{max}$
39 49	7 29 25	0·778	0·790	0·785	0·780	15 30	15 31 20	−18·24	−18·49	−18·88	
40 49	7 38 43	0·717	—	0·715	0·712	14 58	14 55 40	—	−19·75	−19·58	
41 49	7 47 13	0·634	0·648	0·643	0·640	14 12	14 15 20	−21·13	−20·93	−20·40	
42 49	7 54 33	0·560	—	0·570	0·567	13 30	13 34 10	—	−20·76	−20·78	
43 49	8 1 6	0·490	0·488	0·497	0·493	12 50	12 51 50	−22·46	−21·70	−21·37	
44 49	8 6 46	0·414	—	0·416	0·416	12 5	12 6 10	—	−21·44	−21·38	
45 49	8 11 23	0·346	0·337	0·338	0·339	11 25	11 20 40	−19·85	−20·96	−21·29	
46 49	8 15 10	0·260	—	0·262	0·263	10 32	10 33 50	—	−21·19	−21·20	
47 49	8 17 56	0·175	0·190	0·184	0·187	9 39	9 47 10	−16·52	−20·73	−20·67	
48 49	8 19 45	0·098	—	0·111	0·111	8 50	8 58 20	—	−20·38	−20·09	
49 49	8 20 45	0·037	0·039	0·042	—	8 11	8 14·10	−20·23	−19·86	−19·48	
50 49	8 20 46	−0·029	—	−0·026	—	7 27	7 29 0	—	−18·47	−18·61	
51 49	8 20 0	−0·110	−0·096	−0·092	—	6 33	6 44 50	−17·47	−17·70	−18·04	ψ_m
52 49	8 18 24	−0·166	—	−0·153	—	5 54	6 2 40	—	−16·64	−17·21	
53 49	8 16 8	−0·219	−0·215	−0·217	—	5 16	5 18 10	−16·01	−16·38	−16·76	
54 49	8 13 13	−0·290	—	−0·274	—	4 27	4 30 40	—	−16·42	−16·59	
55 49	8 9 24	—	−0·332	—	—	—	—	−16·54	−16·09	—	
56 49	8 5 4	—	—	—	—	—	—	—	−16·53	—	
57 49	7 59 45	—	−0·446	—	—	—	—	−15·28	−15·88	—	
58 49	7 53 57	—	—	—	—	—	—	—	−15·71	—	
59 49	7 47 22	—	−0·559	—	—	—	—	—	—	—	
60 49	7 40 5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
61 49	7 32 10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
62 49	7 23 38	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
63 49	7 14 31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
64 49	7 5 0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
65 49	6 54 10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
66 49	6 44 10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

übergangen werden. Die Columnen mit den Ueberschriften ψ und $\Theta_{\text{beob.}}$ in der Tabelle nebst den schon angegebenen Constanten der Curve geben die Data an, auf welche die Resultate der Berechnungen in den übrigen Columnen sich stützen.

Die Columnen mit der Ueberschrift: „ω berechnet vermittelst der Intervalle von 2^0, 4^0, 6^0“ zeigen bis auf den zweiten Decimal die beste Uebereinstimmung mit einander, obschon, wie gesagt, diese Resultate auf sehr verschiedene Beobachtungen in Bezug auf die Werthe von ψ sich stützen. Auch ω in der dritten Columne, wo „ω berechnet von Θ“ angegeben ist, stimmt ziemlich gut zu den durch Interpolation gefundenen Werthen; wird aber umgekehrt Θ nach der Gleichung (18f), von dem vermittelst Interpolation gefundenen Werthe für ω, berechnet, und dieser Werth, $\Theta_{\text{ber.}}$, mit dem beobachteten Werthe, $\Theta_{\text{beob.}}$, — in der 8. und 7. Columne der Tabelle — verglichen, so treten auch grössere Unterschiede hervor. Der Winkel Θ kann nämlich nur für solche Punkte genauer gemessen werden, wo die eigentliche Curve — oder die Berührungsstelle zwischen der Schreibspitze und der Schreibfläche — von zwei parallelen Linien begrenzt im Mikroskope erscheint, doch auch an solchen Stellen — wie wiederholte Messungen zeigen — mit Differenzen von einigen (etwa 4) Minuten. Diese begrenzenden Linien der Curve sind aber hier und da undeutlich; die Ursache dazu ist wohl darin zu suchen, dass während des Verzeichnens der Curve ein wenig Russ, der an der Schreibspitze haften bleibt, die genannten Grenzen der Curve verwischt, so dass die genaue Richtung der Curve nicht im Mikroskope herauszulesen ist; im nächsten Augenblicke kann der Russ fortfallen und die begrenzenden Linien der Curve können wieder hervortreten. An solchen Stellen, wo die Richtung der Curve nicht deutlich hervortritt, wird auch die Messung des Drehungswinkels ψ nicht sicher; die geringe Breite der Curve macht jedoch, dass bei Einstellung des Fadenkreuzes des Mikroskopes auf der Mitte des vorliegenden weissen Feldes der Fehler nur in Secunden zu rechnen ist, während dagegen der Fehler bei der Messung von Θ sich auf viele Minuten belaufen kann. In Folge dieser Verhältnisse ist die Bestimmung von ω vermittelst Interpolation der Bestimmung vermittelst der beobachteten Werthe für ψ und Θ vorzuziehen.

Was weiter die vermittelst Interpolation für ω' gefundenen Werthe betrifft, so zeigt die Tabelle, dass mit den Intervallen $\Delta\alpha$ von 2^0, 4^0 und 6^0 nicht so nahe mit einander übereinstimmende Werthe für ω' wie für ω herauskommen, und dass die Uebereinstimmung mit den zwei letztgenannten Intervallen am besten ist. Mit den so gefundenen Werthen für ω' sind noch die von den Bedingungsgleichungen (21a)

...(21e) für ϑ_m, f_m, $(\zeta + \psi - \Theta)_m$, Θ_m und $(d\sigma / dt)_m$ berechneten zu vergleichen. Von diesen Punkten liegt jedoch der erstgenannte, ϑ_m, so nahe dem Anfange der Curve, dass ω' für denselben Punkt vermittelst Interpolation nicht bestimmt werden kann (die Interpolation muss nämlich mit Zeilendifferenzen ausgeführt werden; Diagonalinterpolation kann nicht angewandt werden, weil die Serien oder Reihen für Berechnung von ω und ω' hier zu wenig convergiren). Der Punkt ϑ_m muss also ausser Rechnung gelassen werden; die Lagen für die Punkte f_m, $(\zeta + \psi - \Theta)_m$ und $(d\sigma / dt)_m$ giebt die folgende Tab. II an, wo $d\sigma / dt$ nach der Gleichung (18g), f nach (20f) und $(\zeta + \psi - \Theta)$ von den darin eingehenden Grössen berechnet sind; die Berechnungen sind für jeden Grad gemacht; in der Mitte der Tabelle sind die gesuchten maximalen oder minimalen Werthe und zugleich drei Werthe in der nächsten Umgebung auf beiden Seiten derselben angegeben. Die mit den so gefundenen Lagen berechneten Werthe für ω' sind in der letzten Columne der Tab. I eingeführt.

Tabelle II.

f_{min}		$(\zeta + \psi - \Theta)_{min}$		$\left(\frac{d\sigma}{dt}\right)_{max}$	
α	f	α	$\zeta + \psi - \Theta$	α	$\frac{d\sigma}{dt}$
16° 49′	15·71	19° 49′	25° 15′ 7″	35° 49′	104·73
17 49	15·65	20 49	25 9 16	36 49	104·77
18 49	15·61	21 49	24 50 56	37 49	104·80
19 49	15·56	22 49	24 43 50	38 49	104·96
20 49	15·63	23 49	25 2 53	39 49	104·76
21 49	15·68	24 49	25 22 55	40 49	104·73
22 49	15·75	25 49	25 40 32	41 49	104·59

Bei Vergleichung der so gefundenen Werthe für ω' mit den durch Interpolation gefundenen ist daran festzuhalten, dass die Lagen der betreffenden Punkte vermittelst der Messungen nicht genau herauskommen, sondern nur zwei Grenzen erhalten werden, zwischen welchen die Punkte gelegen sind (z. B. für $(d\sigma / dt)_m$ zeigt die Tabelle II nur, dass dieser Punkt zwischen $\alpha = 37^\circ\ 49'$ und $\alpha = 39^\circ\ 49'$ gelegen ist). Unter diesen Verhältnissen ist wohl die Uebereinstimmung der nach ganz verschiedenen Methoden berechneten Werthe für ω' befriedigend.

Der Punkt Θ_m ist bisher übergangen, weil dessen Lage von den Messungen an dieser Curve — wie Tabelle I zeigt — nicht deutlicher

hervortritt, als dass derselbe zwischen $\alpha = 22^0 49'$ und $\alpha = 25^0 49'$ liegt; wird daher ω' nach der Gleichung (21 d) berechnet, so wird, für die Lage $\alpha = 24^0 49'$, $\omega' = -4 \cdot 58^{\text{cm}}$, was auch so ziemlich mit dem vermittelst 6^0 Intervall gefundenen übereinstimmt.

Die genannten Verhältnisse zusammen zeigen weiter, dass die Curvenanalyse ganz unabhängig vom Winkel Θ nebst den Constanten ϱ und S_0 durchgeführt werden kann; die Messungen beziehen sich also nur auf die Bestimmung der Lage α, ψ bezw. t, ψ für gleiche Zeitintervalle; das Intervall ist für Curven, die — wie die hier behandelte — mit einer Winkelgeschwindigkeit o von etwa 5^{cm} gezeichnet sind, zu etwa 2 Grad zu nehmen; die Interpolationen werden aber am besten mit grossem Intervall, z. B. 4^0 oder 8^0, ausgeführt, damit die Beobachtungsfehler in den Werthen für α und ψ nicht zu grossen Einfluss auf die Resultate ausüben; durch Verschiebung des Ausgangspunktes können dann auch die zwischenliegenden Werthe bestimmt werden (wie auch bei der Berechnung der Tabelle I, bei Anwendung von 4^0 oder 6^0 Intervall, verfahren worden ist). Nur im ersten Anfange der Curve muss das kleinste Intervall — 2^0 — angewandt werden, um die Werthe für ω und ω' dem Anfange näher zu bekommen. Hiermit wird die Untersuchungsmethode wesentlich vereinfacht, weil die Messung des Winkels Θ sehr mühsam ist; hiermit gewinnt auch die Methode an Sicherheit, weil ψ bis auf einige Secunden, Θ aber — wie schon gesagt wurde — besten Falles bis auf einige Minuten bestimmt werden kann.

VII. Die Muskelkraft während der Verkürzung des Muskels.

Die vorige Darstellung bezieht sich überall auf die Verhältnisse am aufsteigenden Schenkel der Muskelcurve; die Lage (α, ψ) der Curvenpunkte des herabsteigenden Schenkels kann aber ganz in derselben Weise, wie am aufsteigenden, gemessen werden; solche Messungen müssen auch, wenigstens um drei Intervalle, geschehen, um die Coëfficienten ω und ω' bis zum Curvengipfel vermittelst Interpolation zu berechnen. Werden die Messungen von α, ψ noch weiter gegen das Ende der Curve fortgesetzt, so können die Coëfficienten ω und ω, d. h. die Winkelgeschwindigkeit und die Winkelbeschleunigung beim Herabfallen des Systems gegen die Anfangslage auch für Punkte des herabsteigenden Schenkels berechnet werden. Hier entsteht daher die Frage, welche Bedeutung die so bestimmten Grössen ψ, ω und ω' in Punkten des herabsteigenden Schenkels für die vorliegenden Aufgaben haben. Einige hierher gehörende Fragen können unmittelbar beantwortet

werden; z. B. da ψ die Lage des Systems in Beziehung zur Anfangslage desselben ist, so bestimmt wieder $R\psi$ die Verkürzung des Muskels in der betreffenden Lage (α, ψ), in derselben Weise wie am aufsteigenden Schenkel nach der Gleichung (12) — selbstverständlich unter der Voraussetzung, dass keine Schleuderung des Systems eingetreten ist, so dass der Draht zwischen dem Muskel und dem Systeme gespannt ist. In Folge dessen haben auch die Grössen $R\omega$ und $R\omega'$ hier dieselbe Bedeutung wie am aufsteigenden Schenkel; und da weiter ω, also $d\psi/dt$, am herabsteigenden Schenkel negatives Zeichen hat, so ist hiermit angedeutet, dass die Verkürzung $R\psi$ für zunehmende Zeit nicht zu-, sondern abnimmt, d. h. dass die Verlängerung des Muskels mit der Zeit zunimmt.

Ebenso geht hieraus unmittelbar hervor, dass der Ausdruck: $[Ma \sin\psi + mr\psi]g$ in der Gleichung (13a) die Arbeit, die das System in der betreffenden Lage im Verhältniss zur Anfangslage enthält, und dass

$$(T + T_0)\frac{\omega^2}{2}$$

die Grösse der Bewegung des Systems in derselben Lage bestimmt.

Die Gleichungen (12) und (13a) haben also ganz dieselbe Bedeutung und Anwendung auf dem auf- und herabsteigenden Schenkel der Curve oder während des ganzen Verkürzungsprocesses. Wenn ebenso behauptet wird, dass die Gleichung (11) auch die Kraft bestimmt, womit der Muskel während seiner Verlängerung auf das bewegliche System einwirkt, so muss zuerst die Existenz einer solchen Kraft nachgewiesen sein. Ein Beweis in dieser Beziehung wurde auch — im Jahre 1868 — von Marey[1] gegeben; nachdem nämlich Marey gefunden hatte, „que la période de descente ... (des Schreibarmes beim Verzeichnen einer Muskelcurve) est beaucoup plus longue que celle qui produirait la chute du pois soulevé“, schloss er, „que pendant cette... période le levier ne descend pas librement, mais qu'il est encore retenu par une force contractile ... assez forte ... pour ralentir la descente du levier“.

Einige Beobachtungen von Kühne — im Jahre 1859 — in Bezug auf die Verlängerung des Muskels nach einer Contraction leiten zu einer ähnlichen Folgerung; Kühne's Untersuchung und Resultat sind in folgenden Worten[2] zusammengefasst: „Ein Muskel kehrt ...

---

[1] E. J. Marey, *Du mouvement dans les fonctions de la vie.* Paris 1868. S. 332 bis 338.

[2] W. Kühne, Unters. über Beweg. u. Veränd. d. contr. Substanz. *Arch. f. Anat. u. Physiol.* Jahrg. 1859. S. 815 bis 816.

ohne das Zuthun äusserer Kräfte, nach einer einmaligen Contraction nie wieder in seinen vorigen Zustand zurück.... Man könnte in vielen Fällen denken, dass seine Ausdehnung durch die Reibung verhindert werde, welche er auf einer festen Unterlage erfährt. Legt man aber einen Sartorius auf Quecksilber und lässt man ihn dort durch einen einzigen Inductionsschlag in seiner ganzen Ausdehnung zucken, so wird derselbe sich nach dem Aufhören der Reizung zwar um ein Geringes wieder ausdehnen, ohne künstliche Dehnung aber fortwährend den Anschein eines schwach tetanisirten Muskels behalten. Ruht dagegen der Muskel nicht, sondern hängt er senkrecht herab, so scheint er von selbst aus dem contrahirten Zustande in den erschlafften zurückzusinken. Es ist aber klar, dass er in diesem Falle nur seine frühere Gestalt verlor durch die eigene Schwere.

Die neue Gestalt, die der Muskel nach diesen Beobachtungen von Kühne annimmt, wenn keine Kräfte von aussen einwirken, muss als eine neue Gleichgewichtslage angesehen werden; jede von aussen wirkende Kraft, die diese Gestalt zu ändern strebt, ruft daher eine elastische Kraft, die in entgegengesetzter Richtung wirkt, hervor. In unseren Versuchen ist die Schwere des Muskels und die des Systems eine solche von aussen wirkende Kraft, unter deren Einfluss die Länge des Muskels zunimmt; daher entsteht eine elastische Kraft, die nach oben wirkt und das System, in seinem Bestreben in Folge der Schwere zu fallen, mehr oder weniger hindert oder retardirt. Durch die Untersuchung von Kühne wird also die von Marey erwiesene retardirende Kraft in den nächsten Zusammenhang mit der elastischen Kraft gestellt, die bei der Verlängerung des Muskels in Folge der Schwere entsteht.

Diese retardirende Kraft, deren Existenz also als bewiesen zu betrachten ist, geht vom Muskel aus und wirkt in einer der Schwere entgegengesetzten Richtung, verhält sich also in dieser Beziehung wie die Muskelkraft während der Contraction. Sie ist daher auch als Muskelkraft zu betrachten und kann hier auch mit Q bezeichnet werden; wenn zugleich angegeben wird, auf welchen Theil der Muskelcurve oder des Verkürzungsprocesses diese Kraft sich bezieht, kann hier kein Missverständniss entstehen.

Die nächste Frage wird hier sein, wie die Grösse dieser Kraft zur Zeit t, oder bei der Lage (α, ψ) zu bestimmen ist, wenn die Versuchsanordnung die in Abtheil. I. 2 angewandte wird. In derselben Weise wie dort müssen dann die Kraftmomente und die Winkelbeschleunigung ω' die Gleichung (5) oder, genauer bestimmt, die Gleichung (8) erfüllen. Ist noch dazu, wie in unseren Versuchen, der

Momentarm der Muskelkraft constant, so bestimmt die Gleichung (11) die Muskelkraft Q. Die letztgenannte Gleichung bestimmt also die Grösse der Muskelkraft für jeden Curvenpunkt, und auch in jenen Theilen der Curve, für welche die von Schwann im Jahre 1837 gebrauchte und seitdem in verschiedener Weise vervollkommnete Methode nicht anwendbar ist, nämlich von der Anfangslage, wo die Muskelkraft den Werth Q_1, bestimmt vermittelst der Gleichung (14a), hat bis zu dem Punkte (nahe dem Anfange der Curve), wo die Muskelkraft ihren maximalen Werth Q_m annimmt, und von dem Punkte Q_0 (ein wenig vor dem Curvengipfel), wo dieselbe — wie Schwann im Jahre 1837 kennen lernte — gleich Null wird, bis zum Ende der Curve. Auch in diesen beiden Intervallen findet selbstverständlich ein continuirlicher Uebergang in den Werthen, welche die Muskelkraft annimmt, statt, worüber die Curvenanalyse nähere Auskunft geben kann.

Die Verhältnisse der Muskelkraft in verschiedenen Gebieten der Muskelcurve — unter Voraussetzung, dass der Momentarm R derselben constant gehalten wird — lassen sich deutlicher übersehen, wenn die Gleichung (11) vermittelst der Gleichung (14a) unter die Form:

$$\text{(A)} \qquad Q = Q_1 + K$$

gebracht wird, wo also:

$$\text{(B)} \qquad Q_1 = \frac{(Ma + mr)}{R} g; \quad \text{und:} \quad K = \frac{(T + T_0)\,\omega' - Mag(1 - \cos\psi)}{R}.$$

Hier bezeichnet K den — positiven oder negativen — Zuwachs, den der anfängliche Werth Q_1 der Muskelkraft zur Zeit t oder in der Lage (α, ψ) bekommen hat.

Unter Voraussetzung solcher Versuchsanordnung, dass das System die ganze Zeit an der Bewegung des Muskels theilnimmt, sind hier — mit Beziehung auf die Werthe, die K und damit Q während der Verkürzung des Muskels annehmen — folgende drei Fälle zu unterscheiden:

1. K ist positiv und also: $Q > Q_1$ tritt im Anfange der Curve ein; in der Anfangslage hat nämlich K [nach der Gleichung (B)] den Werth Null, und nacher einen positiven Werth, so lange

$$(T + T_0)\,\omega' > Mag(1 - \cos\psi),$$

d. h. wie die Gleichung (14b) schon gelehrt hat, bis K gleich Null wird und also die Muskelkraft Q ihren anfänglichen Werth Q_1 wiedernimmt. Die Lage des letztgenannten Curvenpunktes kann auch näher bestimmt werden; ist nämlich a gleich Null, also die Versuchsanordnung A. b) in Abtheil. I. 12 realisirt, so wird $K = O$ und $Q = Q_1$,

wenn $\omega' = 0$ ist, d. h. wenn ω ihren maximalen Werth ω_m annimmt, wie schon im Zusammenhange mit der Gleichung (15b) hervorgehoben wurde; ist weiter $a > 0$, so tritt diese Lage früher oder näher dem Anfange ein, während ω' noch einen positiven Werth hat. — Zwischen diesen Grenzen: Q gleich Q_1, ist weiter Q grösser als Q_1 und nimmt in einem Punkte einen maximalen Werth Q_m an.

2. K ist negativ, ihr absoluter Werth nimmt bis Q_1 zu und macht also $Q = 0$; den letztgenannten Curven- oder Zeitpunkt bezeichnen wir mit Q_0. Dass die Muskelkraft während der Contraction bis Null abnimmt, ist bekanntlich von Schwann entdeckt; dass jedoch unter gewissen Verhältnissen der absolute Werth von K nicht vollständig den Werth Q_1 erreicht, sondern nur demselben sich nähert, um dann wieder zuzunehmen, werden Curvenanalysen weiter unten zeigen; diesen minimalen Werth für Q bezeichnen wir in der Folge mit Q_0.

3. K ist negativ, und ihr absoluter Werth nimmt bis Null ab und kann danach wieder positiv werden; während dieses Verlaufes nähert sich Q immer mehr seinem anfänglichen Werthe Q_1.

Die verschiedenen Werthe, die K und damit Q annehmen, sind in erster Linie von der Kraftcomponente:

$$\frac{T + T_0}{R}\,\omega'$$

in Folge der Winkelbeschleunigung ω' abhängig; der Winkel ψ ist nämlich klein, und in Folge dessen der Ausdruck: $(1 - \cos\psi)$ in der Gleichung (B) von Null nicht sehr verschieden; die Grösse:

$$\frac{T + T_0}{R}\,\omega'$$

dagegen variirt zwischen weiten Grenzen; diese Grösse hat im Anfange der Curve positiven Werth, dann negativen und kann gegen das Ende der Curve wieder positiven Werth annehmen.

VIII. Muskelcurven nach wiederholten Reizungen.

1. Die Versuche. Die Reizungen wurden mit Musc. gracilis major, in derselben Weise aber wie in dem in Abtheil. VI angeführten Versuche ausgeführt. Vier Curven, die hier der Zeitfolge nach Curve I, II, III und IV bezeichnet werden, wurden aufgezogen; eben vor dem Verzeichnen der Curven II, III und IV wurde der Muskel mit bezw. 60, 120 und 200 Inductionsschlägen, deren Schliessungs- und Oeffnungsströme Zuckungen hervorriefen, zum vollständigen Tetanus ge-

reizt. Während der ganzen Zeit der Versuche war der Muskel mit ein wenig mehr als 10^{g} belastet.

Beim Betrachten der Curven zeigte die Curve III und noch mehr die Curve IV die gewöhnlichen Zeichen der Ermüdung, verminderte Höhe und vergrösserte Länge; die Messungen hier unten zeigen auch, dass das latente Reizungsstadium t_{10} in den später gezeichneten Curven verlängert worden war. Zu höherem Grade von Ermüdung wurden jedoch die Versuche nicht fortgesetzt, um sehr niedrige Curven, deren Analyse grössere Schwierigkeit macht, zu vermeiden.

2. Die Constanten. Das bewegliche System war drehbar, mit constantem Momentarme und mit Loth versehen. Der Träger (von Aluminium) der Schreibspitze erstreckte sich in gleicher Länge und in gleichen Dimensionen nach beiden Seiten der Drehungsaxe des Systems, und trug auch an den beiden Enden eine ähnliche Schreibspitze (nebst dazu gehörigen Bügeln oder Rahmen). Die Rolle mit dem Halbmesser R war von Hartgummi, bestand aber nur aus zwei durchlöcherten Sectoren (von etwa 40° Oeffnungswinkel), die auf entgegengesetzten Seiten der Drehungsaxe gelegen waren. Diese Anordnungen bezweckten, dass die mit der Axe unbeweglich vereinigten Theile in jeder Lage des Systems equilibrirt wären, und dass also die Versuchsanordnung, von welcher in der Abtheilung I. 12), A. b) die Rede war, realisirt und doch das Trägheitsmoment gering wäre. Bei näherer Untersuchung des Systems zeigte sich, dass eine solche Anordnung jedoch nicht vollständig erreicht war; die unbeweglich mit der Axe vereinigten Theile hatten nämlich ein Moment Ma von etwa 0·8$^{g\text{-}cm}$; bei den Berechnungen waren daher die allgemeinen Gleichungen (11)...(14e) anzuwenden.

In Folge der eben genannten Ursache wurden die Constanten Ma und T/g des Systems vermittelst des Stabes — von dem in der Abtheil. V. 5) die Rede war — bestimmt. Die zu diesem Zwecke ausgeführten drei Versuche ergaben: die Pendelperiode τ' (in der Gleichung (D), Abtheil. V) des zusammengesetzten Systems — durch Beobachtung der Zeit für 30 ganze Schwingungen in zehn Versuchen — zu 0″·860 66 mit einem mittleren Fehler von 0″·000 54; die Grösse des Momentes $[Ma + M'a']$ des zusammengesetzten Systems — durch vier Versuche mit laufenden Gewichten — zu 256·278 2$^{g\text{-}cm}$; und die Pendelperiode τ'' in der Gleichung (H) derselben Abtheil. — durch fünf Versuche, in welchen die Zeit während 100 Schwingungen beobachtet wurde — zu 0″·751 6.

Die zwei ersten Versuche geben hiermit (nach der Gleichung (D) in Abtheil. V) $(T + T')/g$ gleich 4·808 6.

Für Berechnung von $M'a'$ und T'/g waren die Constanten des Stabes:

$$\left.\begin{aligned} l &= 22\cdot00^{\text{cm}} \\ b &= \frac{4\cdot995}{5} \;\; ,, \\ c &= \frac{1\cdot715}{12} \;\; ,, \end{aligned}\right\} \quad \begin{aligned} \varrho_1 &= 0\cdot355^{\text{cm}}; \\ \mu &= 25\cdot086^{\text{g}}; \end{aligned}$$

daher (nach der Gleichung (F) in Abtheil. V) $M'a'$ gleich: $255\cdot462\,0^{\text{g-cm}}$, also: Ma gleich: $0\cdot816\,2^{\text{g-cm}}$, und hiermit (nach der Gleichung (G) derselben Abtheilung) T'/g gleich: $3\cdot653\,2^{\text{g}\,(\text{cm})^2}/g$; also T/g gleich: $1\cdot155\,4^{\text{g}\,(\text{cm})^2}/g$.

Die berechneten Werthe für T'/g und $M'a'$ geben $T'/M'a'g$ gleich: 0·014 300. Dieselbe Grösse berechnet von dem Controlversuche, also von dem dritten der oben genannten Versuche, war: 0·014 309.

Das Loth schliesslich hatte die Constanten:

$$\left.\begin{aligned} m &= 75\cdot59^{\text{g}} \\ h &= 2\cdot75^{\text{cm}} \\ \varrho^2 &= 0\cdot88 \;\; ,, \end{aligned}\right\} \quad r = 0\cdot540^{\text{cm}}.$$

Hieraus geht hervor: mr gleich: $40\cdot818\,6^{\text{g-cm}}$ und (nach der Gleichung (I) in Abtheil. V) T_0/g gleich: $0\cdot085\,9^{\text{g}\,(\text{cm})^2}/g$.

Der Momentarm R der Muskelkraft hatte den Werth: $4\cdot008^{\text{cm}}$. Von den solcher Weise bestimmten Constanten Ma, mr, T/g, T_0/g und R sind die Logarithmen der Coëfficienten in den Gleichungen (11) ... (13a) zu berechnen; diese Gleichungen sind doch erst mit der Beschleunigung g der Schwere zu dividiren, um die Muskelkraft nebst ihren Componenten in der Gleichung (11) und die Energie des Systems nebst ihren Summanden in der Gleichung (13a) in Gramm bezw. Gramm-Centimeter zu messen. In der folgenden Tabelle sind links die für diese Rechnungen nöthigen sechs Logarithmen und rechts die Constanten in den Gleichungen (11)...(14c) (in abgerundeten Zahlen) angegeben:

$\text{Log}\, Ma$	$= 0\cdot911\,796\,6-1$	Ma	$= 0\cdot8$ g-cm
$\text{Log}\, mr$	$= 1\cdot610\,858\,1$	mr	$= 40\cdot8$ g-cm
$\text{Log}\,\frac{T+T_0}{2g}$	$= 0\cdot792\,821\,6-1$	$\frac{T+T_0}{g}$	$= 1\cdot2\,\frac{\text{g}\,(\text{cm})^2}{g}$
$\text{Log}\,\frac{Ma}{R}$	$= 0\cdot308\,868\,9-1$	$\frac{Ma}{R}$	$= 0\cdot2$ g
$\text{Log}\,\frac{mr}{R}$	$= 1\cdot007\,930\,4$	$\frac{mr}{R}$	$= 10\cdot2$ g
$\text{Log}\,\frac{T+T_0}{Rg}$	$= 0\cdot490\,923\,9-1$	$\frac{Ma+mr}{R}$	$= 10\cdot4$ g

Für Berechnung der Winkelgeschwindigkeit o der Schreibfläche (nach der Gleichung (A) in Abtheil. V) ergaben die Messungen, dass 5×9 oder 45 (ganze) Wellenlängen der Zeitcurve unter der längsten Muskelcurve, der Curve IV, einen Winkel α^0 von $117^0\,22'$ (und fünf Wellenlängen einem Winkel zwischen $13^0\,2'$ und $13^0\,3'$) entsprachen. Davon wird:

$$\text{Log.}\, o = 0 \cdot 765\,419\,5; \quad \text{also:} \quad o = 5 \cdot 83^{\text{cm}}.$$

3. Die Messungen des Winkels ψ und des ihm entsprechenden Winkels α wurden ausgeführt mit einem Intervalle von 4^0 vom Anfange der Curven bis zu dem Intervalle, wo die herabsteigenden Schenkel die bezw. Anfangskreise schnitten. Hierbei wurde mit dem Mikroskope (für Messung des Winkels ψ) die Curve I mangelhaft befunden, so dass die Messungen mit dem betreffenden Intervalle nicht über die ganze Curve bewerkstelligt werden konnten; diese Curve ist daher hier ganz weggelassen. Für die Curven II und III wurde die erste Messung mit dem Intervalle von 4^0 bei α gleich $4^0\,54'$ von t_0 gemacht, für die Curve IV aber bei α gleich $8^0\,54'$, weil diese Curve in der erstgenannten Lage sich noch nicht von ihrem Anfangskreise erhoben hatte. Zugleich wurden Messungen von α und ψ mit dem Intervalle von 2^0 und mit den genannten Ausgangspunkten für die Curven II und IV an deren Anfange und Ende, für die Curve III nur an ihrem Anfange gemacht.

4. Die Berechnungen. Die folgenden drei Tabellen — für die Curven II, III und IV — geben in den zwei ersten Verticalcolumnen, mit den Ueberschriften α und ψ, die beobachteten Werthe für diese Grössen, und in den folgenden Columnen die berechneten Werthe für ω, ω' u. s. w., wie die Ueberschriften andeuten (s. die Tabellen auf den folgenden Seiten).

In diesen Tabellen sind die Werthe für ω und die davon hergeleiteten Werthe für:

$$\frac{T + T_0}{g} \frac{\omega^2}{2} \quad \text{und} \quad \frac{E}{g}$$

mit zwei Decimalen angegeben, wenn die Werthe für ω vermittelst Interpolation mit dem Intervalle von 2^0 berechnet sind; dagegen sind dieselben Grössen mit drei Decimalen angegeben, wenn ω vermittelst Interpolation mit 4^0 Intervall bestimmt ist. Damit deuten die Tabellen unmittelbar an, in welcher Weise die Berechnung von ω und den davon hergeleiteten Grössen gemacht ist, obgleich die Werthe für ω, vermittelst 2^0 und 4^0 Intervall bestimmt, in derselben Columne eingeführt sind. Aus demselben Grunde sind ebenso die Werthe von ω' und die davon berechneten Werthe für:

Die Curve II.

Die Messungen ergaben:

$S_0 = 16{\cdot}530^{\text{cm}}$; $t_{10} = 3^0\ 1'$; $\psi_m = 13^0\ 3'\ 7''$; der aufsteigende Schenkel erstreckte sich 53° 37′ von t_0; „ herabsteigende Schenkel „ „ 44° 44′ „ ψ_m bis zu dem Anfangskreise.

Tabelle der Curve II.

α	ψ	ω ber. vermittelst Interv. von 2° od. 4°	ω ber. vermittelst Interv. von 8°	$M\,\alpha \sin\psi$	$m\,r\,\psi$	$\frac{T+T_0}{g}\,\frac{\omega^2}{2}$	$\frac{E}{g}$	ω' ber. vermittelst Interv. von 2° od. 4°	ω' ber. vermittelst Interv. von 8°	$\frac{T+T_0}{Rg}\,\omega'$	$\frac{Q}{g}$	Bemerk.
4° 54′	0° 1′ 40″	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
6 54	0 8 3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
8 54	0 21 37	—	—	—	—	—	—	74·3	—	23	33	
10 54	0 44 14	1·33	—	0·011	0·525	1·10	1·63	77·8	—	24	34	ω_m'; $\frac{Q_m}{g}$
12 54	1 16 22	1·80	—	0·018	0·903	2·00	9·92	70·27	—	21·8	32·1	
14 54	1 57 32	2·16	—	0·028	1·396	2·89	4·32	45·8	—	14	25	
16 54	2 44 31	2·414	—	0·039	1·951	3·603	5·594	33·28	—	10·3	20·7	
18 54	3 36 5	2·56	—	0·051	2·566	4·07	6·70	11·2	—	4	14	
20 54	4 29 17	2·614	—	0·064	3·197	5·241	7·502	8·20	5·94	1·0	11·4	ω_m; $\frac{Q_1}{g}$
22 54	5 23 14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
24 54	6 16 12	2·554	—	0·089	4·460	4·051	8·600	—11·41	-	— 3·5	6·0	

28 54	7 57 38	2·343	2·342	0·113	5·671	3·408	9·192	−23·45	−23·39	− 7·3	3·1	
32 54	9 27 42	1·992	—	0·134	6·740	2·464	9·340	−30·23	—	− 9·4	1·0	
36 54	10 43 1	1·634	1·641	0·151	7·634	1·658	9·444	−32·91	−32·32	−10·2	0·2	
40 54	11 42 13	1·243	—	0·166	8·338	0·959	9·463	−32·30	—	−10·0	0·4	
44 54	12 25 26	0·852	0·847	0·176	8·851	0·450	9·477	−33·16	−33·05	−10·3	0·1	$-\omega_m'; \frac{Q_0}{g}$
48 54	12 52 19	0·454	—	0·182	9·170	0·128	9·480	−33·03	—	−10·2	0·2	
52 54	13 2 55	0·060	0·062	0·184	9·296	0·002	9·488	−32·57	−32·20	−10·0	0·3	ψ_m
56 54	12 57 13	−0·315	—	0·183	9·232	0·062	9·477	−30·01	—	− 9·3	1·1	
60 54	12 37 17	−0·663	−0·664	0·178	8·991	0·274	9·448	−28·27	−28·28	− 8·8	1·6	
64 54	12 3 5	−0·993	—	0·170	8·586	0·612	9·368	−26·80	—	− 8·3	2·1	
68 54	11 15 38	−1·309	−1·312	0·159	8·022	1·064	9·245	−25·99	−26·00	− 8·1	2·3	
72 54	10 15 22	−1·615	—	0·145	7·307	1·620	9·072	−24·91	—	− 7·7	2·7	
76 54	9 2 52	−1·898	—	0·128	6·446	2·236	8·810	−22·17	22·50	− 6·9	3·5	
78 54	8 22 21	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
80 54	7 39 26	−2·150	—	0·109	5·455	2·869	8·433	−19·55	—	− 6·1	4·3	
82 54	6 53 54	−2·26	—	0·098	4·915	3·17	8·18	−14·9	—	− 5	6	
84 54	6 6 29	−2·347	—	0·087	4·351	3·418	7·856	−13·13	—	− 4·1	6·3	
86 54	5 17 20	−2·42	—	0·075	3·768	3·624	7·47	− 9·0	—	− 3	7	
88 54	4 27 1	−2·48	—	0·063	3·170	0·62	3·85	− 8·42	—	− 2·6	7·8	
90 54	3 35 28	−2·52	—	0·051	2·558	0·39	3·00	− 2·3	—	− 0·7	10	
92 54	2 43 36	—	—	—	—	—	—	+ 1·8	—	+ 0·6	11	$-\omega_m; \frac{Q_1}{g}$
94 54	1 51 56	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
96 54	1 1 14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

Die Curve III.

Die Messungen ergaben:

$S_0 = 15{\cdot}175$; $t_{10} = 4^0\,18'$; $\psi_m = 11^0\,35'\,8''$; — der aufsteigende Schenkel erstreckte sich $58^0\,54'$ von t_0, „ herabsteigende Schenkel „ „ $49^0\,47'$ „ ψ_m bis zum Anfangskreise.

Tabelle der Curve III.

α	ψ	ω ber. vermittelst Interv. von 2^0 od. 4^0	ω ber. vermittelst Interv. von 8^0	$M\,a \sin\psi$	$m\,r\,\psi$	$\frac{T+T_0}{g}\,\frac{\omega^2}{2}$	$\frac{E}{g}$	ω' ber. vermittelst Interv. von 2^0 od. 4^0	ω' ber. vermittelst Interv. von 8^0	$\frac{T+T_0}{R\,g}\,\omega'$	$\frac{Q}{g}$	Bemerk.
$4^0\,54'$	$0^0\;0'\,36''$	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
6 54	0 3 35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
8 54	0 10 57	—	—	—	—	—	—	43	—	13	23	
10 54	0 23 41	0·79	—	0·006	0·281	0·38	0·67	58·7	—	18	29	ω_m'; $\frac{Q_m}{g}$
12 54	0 43 27	1·11	—	0·010	0·516	0·77	1·30	54·79	—	17·08	27·4	
14 54	1 9 28	1·43	—	0·016	0·825	1·30	2·11	55·8	—	17	27	
16 54	1 42 2	1·678	—	0·024	1·212	1·747	2·983	38·02	—	11·8	22·8	
18 54	2 18 53	1·88	—	0·033	1·649	2·20	3·88	28·1	—	9	19	
20 54	2 59 9	2·012	—	0·048	2·127	2·513	4·683	16·84	17·47	5·1	15·4	
22 54	3 41 21	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
24 54	4 24 30	2·097	—	0·068	3·141	2·780	5·933	− 0·71	--	− 0·2	10·2	ω_m; $\frac{Q_1}{g}$

28 54	5 49 48	2·028	2·010	0·083	4·153	2·554	6·791	− 9·77	−10·08	− 3·0	7·4	
32 54	7 10 24	1·871	—	0·102	5·110	2·172	7·384	−16·25	—	− 5·0	5·4	
36 54	8 23 5	1·652	1·649	0·119	5·973	1·694	7·786	−20·06	−20·44	− 6·2	4·2	
40 54	9 25 53	1·387	—	0·134	6·719	1·194	8·046	−23·81	—	− 7·4	3·0	
44 54	10 17 2	1·096	1·098	0·146	7·326	0·746	8·218	−24·78	−25·14	− 7·7	2·7	
48 54	10 55 59	0·789	—	0·155	7·789	0·387	8·330	−26·63	—	− 8·3	2·1	
52 54	11 21 48	0·462	0·462	0·161	8·095	0·133	8·389	−27·68	−27·50	− 8·6	1·8	$-\omega'_m;\ \frac{Q_0}{g}$
56 54	11 34 2	0·133	—	0·164	8·241	0·011	8·415	−27·18	—	− 8·4	2·0	ψ_m
60 54	11 32 52	−0·190	−0·188	0·163	8·227	0·023	8·413	−26·61	−26·14	− 8·2	2·1	
64 54	11 18 39	−0·491	—	0·160	8·058	0·150	8·368	−23·86	—	− 7·4	3·0	
68 54	10 52 43	−0·767	−0·769	0·154	7·750	0·365	8·269	−22·54	−22·30	− 7·0	3·4	
72 54	10 15 41	−1·026	—	0·145	7·310	0·653	8·109	−20·67	—	− 6·4	4·0	
76 54	9 28 28	−1·264	−1·267	0·134	6·750	0·992	7·876	−19·25	−19·35	− 6·0	4·4	
80 54	8 31 45	−1·489	—	0·121	6·076	1·375	7·772	−18·01	—	− 5·6	4·8	
84 54	7 26 13	−1·685	−1·684	0·106	5·298	1·762	7·166	−14·84	−15·21	− 4·6	5·8	
88 54	6 13 23	−1·849	—	0·088	4·433	1·122	6·643	−12·51	—	− 3·9	6·5	
92 54	4 54 28	−1·972	—	0·070	3·496	2·414	5·980	− 7·73	− 8·16	− 2·4	8·0	
96 54	3 31 46	−2·034	—	0·050	2·514	2·568	5·133	− 2·49	—	− 0·8	9·6	$-\omega_m;\ \frac{Q_1}{g}$
100 54	2 7 59	—	—	—	—	—	—	+ 6·31	—	+ 2·0	15·3	
104 54	0 47 34	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
108 54	−[0 21 59]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

Die Curve IV.

Die Messungen ergaben:

$S_0 = 14 \cdot 700^{\text{cm}}$; $t_{10} = 4^0\ 34'$; $\psi_m = 8^0\ 6'\ 48''$; } der aufsteigende Schenkel erstreckte sich $60^0\ 35'$ von t_0; „ herabsteigende Schenkel „ „ $58^0\ 7'$ von ψ_m bis zum Anfangskreise.

Tabelle der Curve IV.

α	ψ	ω ber. vermittelst Interv. von 2⁰ od. 4⁰	ω ber. vermittelst Interv. von 8⁰	$M\,a \sin\psi$	$m\,r\,\psi$	$\frac{T+T_0}{g}\frac{\omega^2}{2}$	$\frac{E}{g}$	ω' ber. vermittelst Interv. von 2⁰ od. 4⁰	ω' ber. vermittelst Interv. von 8⁰	$\frac{T+T_0}{Rg}\omega'$	$\frac{Q}{g}$	Bemerk.
6⁰ 54′	0⁰ 1′ 12″	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
8 54	0 4 15	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
10 54	0 10 12	—	—	—	—	—	—	32·6	—	10	20	
12 54	0 20 5	0·57	—	0·005	0·238	0·20	0·45	31·5	—	10	20	
14 54	0 33 53	0·78	—	0·008	0·402	0·37	0·79	35·7	—	11	21	ω_m'; $\frac{Q_m}{g}$
16 54	0 51 59	0·97	—	0·012	0·617	0·58	1·21	30·10	—	9·3	19·7	
18 54	1 13 32	1·13	—	0·017	0·873	0·80	1·69	28·20	—	9	19	
20 54	1 38 27	1·271	—	0·023	1·169	1·002	2·194	19·73	—	6·1	16·5	
22 54	2 5 34	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
24 54	2 34 31	1·420	—	0·037	1·835	1·251	3·122	5·60	1·71	1·7	12·1	
28 54	3 33 34	1·485	—	0·051	2·536	1·277	3·864	− 2·28	—	− 0·7	9·7	ω_m; $\frac{Q_1}{g}$
32 54	4 31 3	1·371	1·364	0·064	3·225	1·166	4·455	− 8·80	− 8·45	− 2·6	7·8	
36 54	5 25 36	1·241	—	0·077	3·866	1·957	4·000	− 12·91	—	− 4·0	0·4	

40 54	6 13 20	1·076	1·076	0·088	2·433	0·718	5·240	−14·58	−15·21	− 4·5	5·9	
44 54	6 53 50	0·881	—	0·098	4·914	0·482	5·494	−17·67	—	− 5·5	4·9	
48 54	7 25 42	0·670	0·671	0·106	5·292	0·278	5·676	−17·46	−18·15	− 5·4	5·0	
52 54	7 48 53	0·449	—	0·111	5·567	0·125	5·804	−19·43	—	− 6·0	4·4	
56 54	8 2 33	0·218	0·216	0·114	5·730	0·029	5·873	−19·18	−19·45	− 5·9	4·4	$-\omega_m'$; $\frac{Q_0}{g}$
60 54	8 6 45	−0·014	—	0·115	5·779	0·000	5·895	−19·27	—	− 6·0	4·4	ψ_m
64 54	8 1 30	−0·237	−0·235	0·114	5·717	0·035	5·866	−17·68	−17·59	− 5·5	4·9	
68 54	7 47 34	−0·433	—	0·111	5·633	0·117	5·861	−15·01	—	− 4·6	5·7	
72 54	7 26 13	−0·599	−0·614	0·106	5·298	0·223	5·627	−12·66	−12·45	− 3·9	6·5	
76 54	6 58 38	−0·732	—	0·099	4·971	0·332	5·402	− 9·76	—	− 3·0	7·4	
80 54	6 26 9	−0·846	−0·850	0·091	4·585	0·444	5·121	− 9·30	− 8·91	− 2·9	7·5	
84 54	5 49 7	−0·947	—	0·083	4·145	0·557	4·784	− 7·48	—	− 2·3	8·1	
88 54	5 8 22	−1·031	−1·030	0·073	3·661	0·660	4·394	− 6·51	− 6·22	− 2·0	8·4	
92 54	4 24 27	−1·095	—	0·063	3·140	0·744	3·946	− 4·07	—	− 1·3	9·1	
94 54	4 1 51	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
96 54	3 38 30	−1·135	—	0·052	2·594	0·799	3·445	− 2·59	− 2·38	− 0·8	9·6	
98 54	3 15 1	−1·15	—	0·046	2·316	0·81	3·18	− 1·9	—	− 0·6	10	
100 54	2 51 20	−1·149	—	0·041	2·034	0·819	2·894	+ 0·64	—	+ 0·2	10·6	$-\omega_m$; $\frac{Q_1}{g}$
102 54	2 27 44	−1·14	—	0·035	1·754	0·81	2·60	+ 2·9	—	1	11	
104 54	2 4 30	−1·116	—	0·030	1·478	0·774	2·281	5·01	—	1·6	11·9	
106 54	1 41 58	−1·08	—	0·024	1·211	0·72	1·96	5·7	—	2	12	
108 54	1 20 11	−1·03	—	0·019	0·952	0·66	1·63	10·50	—	3·3	13·6	
110 54	0 59 44	−0·95	—	0·014	0·709	0·56	1·29	14·8	—	5	15	
112 54	0 41 5	—	—	—	—	—	—	16·0	—	5	15	
114 54	0 24 26	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
116 54	0 10 17	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

$$\frac{T + T_0}{R g}\,\omega' \quad \text{und} \quad \frac{Q}{g}$$

in ganzen Zahlen angegeben, wenn ω' vermittelst 2° Intervall berechnet ist, dagegen mit einem Decimal, wenn die Berechnung von ω' auf Interpolation mit 4° Intervall sich stützt.

In den Tabellen sind weiter alle Summanden eingeführt, welche die Energie des Systems [E/g in Gramm-Centimetern] zusammensetzen, für die Muskelkraft [Q/g in Gramm] dagegen ist nur die Kraftcomponente:

$$\frac{T + T_0}{R g}\,\omega'$$

angegeben, weil von ihren übrigen Componenten $m r/R$ einen constanten Werth (von 10·2 g), und $M a \cos\psi/R$ einen beinahe constanten Werth (von 0·2 g) hat.

Nachdem alle die eben genannten Berechnungen gemacht waren, haben wir noch die Werthe für ω und ω' vermittelst des Intervalles von 8° (doch nur mit einem Ausgangspunkte für jede Curve) hergeleitet, um die so gewonnenen Resultate mit denen vermittelst 4° Intervall gefundenen auch in diesen Curven zu vergleichen; die so für ω und ω' gefundenen Werthe sind in verschiedenen Columnen angegeben. Die Vergleichung der beiden, mit 4° und 8° Intervall berechneten Werthe zeigt hier ganz dasselbe wie die Vergleichung der mit 4° und 6° gewonnenen Resultate in der oben (Abtheil. VI) analysirten Curve, und auch dass grössere Unterschiede in ω' in der Umgebung von ω_m, wo ω' ihr Zeichen verändert, hervortreten.

5. Kriterien für die Schleuderung des Systems. Für die Beurtheilung der physiologischen Verhältnisse wäre es hier vor Allem von Gewicht, entscheiden zu können, ob wirklich das bewegliche System während des ganzen Verkürzungsprocesses an der Bewegung des Muskels bezw. an der seines freien Endes Theil genommen hat. Die Gleichung (14e) liefert wohl in dieser Beziehung das Kriterium, dass dann die Energie E/g des Systems continuirlich bis zum Curvengipfel ψ_m wachsen muss; der Zuwachs, den die Tabellen in der Nähe von ψ_m zeigen, ist aber zu gering, um hier die Frage mit Sicherheit zu entscheiden. (Die Werthe für ψ_m sind im Zusammenhange mit den Tabellen angegeben, und die Lage von ψ_m ist in jeder Curve im nächstfolgenden Intervalle von der Stelle, wo ψ_m in der letzten Columne der Tabellen — mit der Ueberschrift Bemerkung — eingeschrieben ist.)

Hier kann aber auch ein anderes Kriterium angewandt werden; im Falle einer Schleuderung des Systems hört die Muskelkraft auf,

auf das System einzuwirken, d. h. Q ist gleich Null und die Gleichung (14d) muss verificirt werden. Dies ist aber entschieden nicht der Fall in den Curven III und IV, wie die Columnen für Q/g zeigen; für diese Curven ist also eine Schleuderung ausgeschlossen. Für die Curve II dagegen könnte ein solches Verhältniss angenommen werden, weil Q/g ein wenig vor dem Curvengipfel, in der Lage α gleich 44° 54′ nach der Tabelle, sehr klein ist, den Werth von nur $0 \cdot 1^g$ hat, und weil weiter mit dieser Deutung vermittelst der Gleichung (14d) ω' den Werth: $-33 \cdot 53^{cm}$ annimmt, was als übereinstimmend mit den in den Tabellen angegebenen Werthen: $-33 \cdot 16$ und $-33 \cdot 05$ betrachtet werden kann. Diese Uebereinstimmung ist jedoch nicht besonders genau; weiter unten betrachten wir auch diese Frage in anderer Weise.

6. **Regelmässigkeiten in den Werthen von ω und ω'.** Weil der Winkel ψ eine Function der Zeit und ω der erste Differentialcoëfficient $d\psi/dt$ desselben ist, so ist ω gleich Null in dem Curvengipfel, wo ψ den maximalen Werth ψ_m annimmt, wie übrigens schon in der Abtheil. III. 7 nach der Gleichung (21f) hervor ging; weiter ist ω positiv auf dem aufsteigenden, und negativ auf dem herabsteigenden Schenkel, weil ψ mit der Zeit in jenem Falle zu-, in diesem abnimmt. Hieraus wieder folgt, dass ω auf dem aufsteigenden Schenkel einen maximalen Werth: ω_m, und dass $-\omega$ auf dem herabsteigenden einen maximalen Werth: $-\omega_m$ annimmt, weil ω in beiden Fällen ihren Werth zwischen den Grenzen Null und Null verändert. Diese Curven- oder Zeitpunkte ω_m und $-\omega_m$ treten in den vorliegenden drei Curven hervor, und sind, dem Intervalle nach, in der letzten Columne der Tabellen angegeben.

Weil weiter, ganz in derselben Weise, ω' der Differentialcoëfficient $d\omega/dt$ von ω ist, so hat diese Grösse den Werth Null in den Punkten ω_m und $-\omega_m$, und ist im Intervalle zwischen diesen Punkten negativ, ausserhalb dieses Intervalles dagegen positiv. Hieraus folgt wieder, dass ω' ein positives Maximum ω_m' zwischen dem Anfange der Curve und ω_m hat, und ein negatives Maximum, $-\omega_m'$, zwischen ω_m und $-\omega_m$ annimmt. Die Lage dieser Punkte (ω_m' nahe dem Curvenanfange und $-\omega_m'$ ein wenig vor dem Curvengipfel ψ_m) ist in der letzten Columne der Tabellen, dem Intervalle nach, angedeutet. Die Tabelle der Curve III und besonders die der Curve IV zeigen weiter, dass ω' vom Punkte $-\omega_m$ gegen das Ende der Curve positiv ist und mit der Zeit zunimmt; ihr weiteres Verhalten zeigen die Tabellen nicht, weil die Messungen nur zu dem Intervalle, wo der Schnittpunkt der Curve mit dem Anfangskreise liegt, fortgesetzt waren.

Diese Regelmässigkeiten im Verlaufe der Werthe für ω und ω' treten in jeder Curve, die in derselben Weise wie die betreffenden gezeichnet ist, hervor; die Lagen dieser Punkte aber wechseln mit den Constanten des Systems und dem Zustande des Muskels. Was übrigens die Bestimmung der Lagen dieser Punkte betrifft, so treten dieselben, je nach dem Intervalle wo sie liegen, unmittelbar bei Berechnung der Interpolationstabellen für Bestimmung der Werthe für ω und ω' hervor; genauere Bestimmung dieser Lagen ist für die hier vorliegenden Zwecke nicht nöthig.

Die Bedeutung der so bestimmten Zeit- oder Curvenpunkte ω_m', ω_m, $-\omega_m'$ und $-\omega_m$ liegt unter Anderem darin, dass sie in einem gewissen Zusammenhange mit den Specialwerthen stehen, die die Muskelkraft während der Zuckung annimmt, wie schon die Verhältnisse bei der Anordnung A. b in der Abtheil. I. 12 gezeigt haben und wie hier unten des Näheren hervorgeht.

7. Jede von den drei Tabellen zeigt, dass die Muskelkraft Q/g erst bis zu einem maximalen Werthe $(Q/g)_m$, nahe dem Curvenanfange, zunimmt und so bis zu einem minimalen Werthe Q_0/g, nahe vor dem Curvengipfel ψ_m, abnimmt; der maximale Werth $(Q/g)_m$ ist grösser (34, 29 und 21^g bezw. in Curve II, III und IV), und der minimale Werth Q_0/g ist kleiner (0·1, 1·8 und 4·4^g der Zeitfolge der Curven nach), je weniger der Muskel ermüdet ist. In diesem Verlaufe vom anfänglichen Werthe Q_1/g zum minimalen Werthe Q_0/g nimmt die Muskelkraft in einem Punkte den anfänglichen Werth Q_1/g wieder an, und dieser Punkt wird um so mehr gegen den Curvengipfel verschoben, je mehr der Muskel ermüdet ist (in den drei Curven ist nämlich die Lage dieses Punktes von t_0 etwa 20°, 24° und 28°). Die Tabellen zeigen, dass die Lage für Q_0/g mit der Ermüdung ebenso verschoben wird.

Während des weiteren Verlaufes vom Punkte Q_0/g gegen das Ende der Curve nimmt die Muskelkraft wieder zu und bekommt auf dem herabsteigenden Schenkel noch ein Mal den anfänglichen Werth Q_1/g; auch dieser Punkt wird durch die Ermüdung weiter (von etwa 90° zu 96° bezw. 100°) vom Anfange verschoben. Von diesem Werthe Q_1/g wächst die Muskelkraft mit der Zeit noch mehr wie die Curve III und besonders die Curve IV zeigt); dass auch hier ein maximaler Werth $(Q/g)_m$ eintreten muss, versteht sich, weil die Muskelkraft nach der Zuckung den anfänglichen Werth wieder nimmt; aus schon (in dieser Abtheil. 6) genanntem Grunde tritt jedoch ein solcher Werth in den Tabellen nicht hervor.

Die Tabellen zeigen weiter, dass die Lagen für die so definirten

Werthe: Q_m/g, Q_1/g, Q_0/g und Q_1/g mit den oben gefundenen Punkten bezw. ω_m' ω_m, $-\omega_m'$ und $-\omega_m$ nahe zusammenfallen; dies Verhältniss hängt davon ab, dass im beweglichen Systeme die Constante Ma im Verhältniss zur Constante mr sehr klein ist; wäre nämlich Ma gleich Null, so würden diese Lagen genau mit einander zusammenfallen, wie schon die Darstellung in Abtheil. I. 12. A. b) gelehrt hat.

Das Verhalten der Muskelkraft beim Uebergange vom anfänglichen Werthe Q_1/g zum Q_0/g steht in Uebereinstimmung mit dem Schwann'schen Gesetze, wenn nur beachtet wird, dass dies Gesetz für nichtermüdete Muskeln gilt. Aus diesem Grunde scheint es richtiger und mehr übereinstimmend mit den Verhältnissen der Curven III und IV, auch die Curve II als von einem, wenn auch nur wenig ermüdeten Muskel gezeichnet zu betrachten (der Muskel war ja auch, eben vor dem Verzeichnen der Curve II, zum vollständigen Tetanus durch 60 Inductionsschläge gereizt). Dann ist in dieser Curve Q_0/g nicht gleich Null, sondern — wie die Tabelle andeutet — nur sehr klein; und für den Curvenpunkt Q_0/g oder $-\omega_m'$ gilt nicht die Gleichung (14d), wie in dieser Abtheil. 5 bei der Berechnung von ω' vorausgesetzt wurde.

Untersuchungen über die bei einer einzelnen momentanen Hautreizung auftretenden zwei stechenden Empfindungen.[1]

Von

Torsten Thunberg.

(Aus dem physiologischen Laboratorium der Universität Upsala.)

1. Einleitung. Auftreten zweier Stichsensationen bei einer einzigen Reizung. Aeusserlicher stechender und innerlicher dumpfer Schmerz.

Im Folgenden soll über einige Studien berichtet werden, die sich auf das Phänomen beziehen, dass eine einzige thermische, mechanische oder elektrische Reizung der Haut unter gewissen Bedingungen nicht eine einzige, sondern zwei stechende Empfindungen hervorruft.

Veranlasst wurden diese Untersuchungen durch eine Beobachtung, die ich bei der Anwendung von ihrer Stärke nach gut abgepassten thermischen Hautreizen — verschieden dicke, auf derselben Temperatur gehaltene Silberlamellen wurden mit der Haut in Berührung gebracht (1. S. 537)[2] — machte, nämlich der, dass dabei manchmal zwei stechende Empfindungen auftraten.

Ich habe später gefunden, dass eine ähnliche Beobachtung bei Anwendung thermischer Hautreize schon von Rosenbach (4. S. 338) gemacht worden ist, welcher fand, dass, wenn die Haut genügende Zeit hindurch mit einem hinreichend warmen Gegenstande erwärmt wird, die Schmerzempfindung zwei bis drei Mal an- und abschwillt. Die Ursache hierfür sieht er darin, dass die Wärme von dem die Haut berührenden Gegenstande sich mehrere Male nach einander durch

---

[1] Der Redaction am 22. October 1901 zugegangen.

[2] Betreffs einiger anderen Beobachtungen, die auch den hier behandelten Gegenstand berühren, sei auf Gad und Goldscheider (2. S. 397) und auf Naunyn (3) verwiesen. Die in Klammern gesetzten Zahlen nach den Verfassernamen beziehen sich auf das Litteraturverzeichniss am Schlusse dieser Arbeit.

die Haut entladet. Dafür spricht seiner Meinung nach der Umstand, dass die Haut an der Berührungsstelle wärmer wird, also eine Wärmeanhäufung stattgefunden hat. Proportional mit dieser Wärmeentladung soll nun die Schmerzempfindung an- und abschwellen.

Hierzu mag bemerkt werden, dass die Annahme einer stossweise geschehenden Wärmeausgleichung in keiner Weise mit den Gesetzen übereinstimmt, denen der Wärmeaustausch zwischen zwei einander berührenden Körpern in gewöhnlichen Fällen gehorcht. Schlechthin verneinen lässt sich ja allerdings nicht die Möglichkeit, dass die lebenden Gewebe besondere Eigenthümlichkeiten auch hinsichtlich der Wärmeausgleichung aufweisen können, aber ohne wirklichen Grund darf eine solche Annahme nicht gemacht werden.

Es sei weiter auf einige Untersuchungen von Gad und Goldscheider (2. S. 397) hingewiesen, welche die hier behandelte Frage sehr nahe berühren.

Der Ausgangspunkt für die Untersuchungen dieser Forscher war eine von Goldscheider (2. S. 44) gemachte Beobachtung, dass man bei einer hinreichend starken mechanischen Reizung der Haut zuerst eine Berührungsempfindung erhält, worauf eine stechende Schmerzempfindung folgt. Goldscheider beschreibt das Phänomen mit folgenden Worten: „Wenn man mit einer Messerspitze schnell, am besten die Hohlhand berührt, so tritt momentan nur die Tastempfindung auf, welcher dann erst der stechende Schmerz folgt."

Im Verein mit Gad setzte er dann seine Untersuchungen fort, und diese beiden Forscher beschreiben folgendes Phänomen, das sie als mit dem vorher von Goldscheider beschriebenen identisch ansehen (2. S. 397). Uebt man mit einer Nadelspitze einen leichten Druck auf die Haut aus, so hat man ausser der ersten sofort eintretenden stechenden Empfindung nach einem empfindungslosen Intervall eine zweite, gleichfalls stechende Empfindung, welche sich in ihrem Charakter dadurch von der ersten unterscheidet, dass ihr nichts von Tastempfindung beigemischt ist, sie vielmehr gleichsam wie von innen zu kommen scheint. Bei mässiger, noch nicht schmerzhafter Intensität der primären Empfindung kann die secundäre schmerzhaft sein. Wird die Intensität des Eindruckes so gesteigert, dass die erste Sensation schmerzhaft ist, so wird die zweite im Verhältniss zur ersten schwächer. Das Phänomen der secundären Empfindung tritt schon bei sehr schwachen, vom Schwellenwerthe nicht weit entfernten Reizen auf."

Die Deutung, die Gad und Goldscheider dem Phänomen geben, stützt sich auf das Verhalten desselben bei elektrischer Reizung.

Sie fanden nämlich Folgendes. Wenn einzelne Inductionsschläge auf die Haut applicirt werden, so tritt das Phänomen nicht auf, dagegen lässt es sich leicht bei Anwendung einer Reihe von Inductionsschlägen nachweisen. Ein einzelner Inductionsschlag giebt bloss eine einzige Empfindung, welche Stärke man auch anwenden möge vom Minimum perceptibile an bis zu einer solchen Stärke des Inductionsschlages, dass man excentrische Empfindungen bekommt. Im Besonderen tritt das Phänomen nicht auf, wenn die Stärke der Empfindung gleich der ist, welcher bei mechanischer Reizung die Secundärempfindung folgt. Lässt man aber mehrere Inductionsschläge in geeigneter Anzahl und in geeignetem Rhythmus auf einander folgen, so tritt die Secundärempfindung nach einem den primären Empfindungen folgenden empfindungslosen Intervall auf. Diese Secundärempfindung hat denselben Charakter wie die primäre, nur mit dem Unterschiede, dass sie nicht discontinuirlich ist.

Goldscheider und Gad meinen nun, dass die Entstehung der secundären Empfindung auf einer Summirung beruht. Im Einzelnen denken sie sich das auf folgende Weise. Die Berührungs- und Schmerzempfindungen werden ihrer Ansicht nach durch dieselben Nerven der Haut vermittelt. Diese Nerven theilen sich im Rückenmark in zwei Bahnen, deren eine mehr direct zu dem Centrum für die bewussten Berührungs- (Druck)- Empfindungen geht. Eine Reizung der Haut bewirkt also auf diesem Wege eine Berührungsempfindung. Zum Theil wird aber der Reiz auch auf der zweiten Bahn im Rückenmark nach dessen grauer Substanz fortgeleitet und trifft dort auf Zellen, die vor der Hand nur in einen veränderten Reizbarkeitszustand versetzt werden. Erst wenn mehrere Reize nach einander auf diese Weise die Zelle erreichen, wird die angehäufte Energie in Arbeit umgesetzt, und die Zelle sendet nun selbst einen Reiz aus, der auf seinem besonderen Wege das Gehirn erreicht und dort eine Schmerzempfindung hervorruft. Weil also eine Summirung von Reizen in dieser Bahn stattfindet, nannten sie dieselbe die Summirungsbahn.

Diese Deutung erklärt nur das Phänomen, dass einer primären Berührungsempfindung nach einem empfindungslosen Intervall eine Schmerzempfindung folgt. Durch die Annahme, dass ein einziger Reiz von genügender Stärke im Stande ist, durch die Summirungsbahn durchzubrechen, erklären sie die Thatsache, dass schon die primäre Sensation eine Schmerzempfindung sein kann. Aber auch Reize von der Stärke, dass jeder einzelne die Summirungsbahn durchbricht, summiren sich. Dafür spricht, dass eine wenn auch unbedeutende secundäre Empfindung auftritt, auch wenn schon die primäre von einer

Serie von Inductionsschlägen hervorgerufene Empfindung schmerzhaft war. Wie oben erwähnt, konnte ein einziger mechanischer Reiz — ein Nadelstich z. B. — eine secundäre Empfindung veranlassen. Ein einziger mechanischer Reiz führt also zu dem Resultat, zu dem eine Serie von Inductionsschlägen nothwendig ist. Diesen Umstand deuten sie so, dass der mechanische Hautreiz, was seine Wirkung betreffs der Auslösung von Nervenreiz angeht, stets einer Serie von Inductionsschlägen entspricht, also nicht einen einzigen, sondern mehrere centripetale Nervenreize bewirkt.

Die Deutung der secundären Schmerzempfindung als auf einer in der grauen Substanz des Rückenmarks geschehenden Reizsummirung beruhend steht nun nach der Meinung Gad's und Goldscheider's in gutem Einklang mit dem, was man von den Bahnen im Rückenmark weiss. Sie weisen z. B. auf Schiff's Versuche bei Durchschneidung der grauen Substanz hin, wobei die Fortleitung der Schmerzempfindungen, aber nicht die der Berührungsempfindungen aufgehoben war. In dem Verhalten bei Gliose wollen sie auch eine Stütze für ihre Deutung sehen. Sie weisen auch auf die Bedingungen für die Auslösung von Reflexen hin, wofür ja nach Stirling eine Summirung mehrerer Reize nothwendig ist, wenn nämlich der Reiz nicht ausnahmsweise stark ist, in welchem Falle schon ein einziger genügen kann. Sie erblicken weiter eine Bestätigung für die Richtigkeit ihrer Deutung in verschiedenen Beobachtungen bei gewissen Nervenkrankheiten, vor Allem in der manchmal auftretenden Erscheinung verlangsamter Schmerzempfindung (Naunyn, 4. S. 272), wozu sie in der secundären Schmerzempfindung einen physiologischen Prototyp sehen.

Wie wir oben gezeigt haben, ruht also Gad's und Goldscheider's Auffassung von der secundären Empfindung auf der Annahme, dass Druckempfindungen und Schmerzempfindungen durch dieselben nervösen Bildungen in der Haut vermittelt werden.

Neuere Untersuchungen von v. Frey (5) scheinen indessen die Unrichtigkeit dieser Anschauungsweise erwiesen zu haben. v. Frey wies nämlich mit Hülfe punktförmiger, für den Zweck besonders abgepasster Reize nach, dass Druck- und Schmerzempfindungen nicht von denselben, sondern von verschiedenen Punkten der Haut aus ausgelöst werden; er nennt diese Punkte Druck- bezw. Schmerzpunkte und glaubt den Wahrscheinlichkeitsbeweis dafür erbringen zu können, dass die letzteren durch die intraepithelialen freien Nervenenden, die ersteren an behaarten Stellen durch die Nervenkränze rings um die Haare, an den übrigen Stellen durch die Meissner'schen Endorgane

bedingt werden. Gegenüber mechanischen und elektrischen Reizen zeichnen sich nun die Druckpunkte durch die Schnelligkeit, mit der sie reagiren, „durch ihre grosse Beweglichkeit“ aus, die Schmerzpunkte dagegen zeigen für schwachen Reiz sehr lange Latenz, gegenüber schnell sich ändernden bezw. oscillirenden Reizen sehr grosse Trägheit, so dass die Empfindung oft „die Form des Nachhinkens annehmen kann“ (5. S. 264).

Die Deutung, die v. Frey für die Erscheinung giebt, dass ein momentaner Stich erst eine Druckempfindung, dann eine Schmerzempfindung giebt, gründet sich auf diese Eigenschaften bei den ververschiedenen Endorganen. Bei gleichzeitiger Reizung kommt wegen der grösseren Trägheit des Schmerzorgans die Schmerzempfindung später. Eine Stütze für diese Deutung sieht er in den Resultaten, die er bei Reizung der verschiedenen Sinnespunkte erhielt (5. S. 243). An freiliegenden Druckpunkten fehlt bei mechanischer Reizung die Secundärempfindung. Liegen dagegen ein Druck- und ein Schmerzpunkt nahe bei einander, so tritt die Secundärempfindung auf. An freiliegenden Schmerzpunkten fehlt dagegen die Druckempfindung. Goldscheider's Versuch ist also nach v. Frey nur ein Beweis dafür, dass zwei nervöse Apparate sich ein und demselben Reiz gegenüber verschieden verhalten können.

Gad und Goldscheider haben indessen bei ihren Studien sich auch mit einer Erscheinung beschäftigt, die nicht aus einer primären Berührungsempfindung und einer secundären Schmerzempfindung besteht und die daher nicht unter die von v. Frey gegebene Erklärung fällt. Einerseits berichten sie, dass schon die primäre Empfindung eine Schmerzempfindung sein kann, wenn auch dabei, wie sie betonen, das empfindungslose Intervall nicht so ausgeprägt sich findet. „Wird die Intensität des Eindrucks so gesteigert, dass die erste Sensation schmerzhaft ist, so wird die zweite im Verhältniss zur ersten schwächer und tritt weniger deutlich hervor, da das leere Intervall zum Theil von der nachdauernden ersten Empfindung ausgefüllt wird“ (2. S. 397).

Was dieses Verhältniss betrifft, so scheint v. Frey die erste Schmerzempfindung als die eigentliche, die zweite als „ein Nachhinken der Erregung“ zu betrachten.

Aber auch abgesehen von diesem von Gad und Goldscheider erwähnten Umstande, dass schon die primäre Empfindung schmerzhaft sein kann, gilt andererseits, worauf wir oben hingewiesen haben, dass nämlich Gad und Goldscheider es oft mit einer Erscheinung zu thun hatten, die nicht aus einer primären Berührungsempfindung und

einer secundären Schmerzempfindung besteht. Was ich hiermit meine, dürfte sich aus dem Folgenden ergeben.

Nach dem, was nunmehr mit hohem Wahrscheinlichkeitsgrade bewiesen worden ist, besitzt die Haut mindestens vier verschiedene Arten von Nerven, nämlich Kälte-, Wärme-, Berührungs- und Schmerznerven. Die drei ersten Arten von Nerven haben ihre Namen nach dem Empfindungsinhalte der durch sie ausgelösten Sensationen unangesehen ihres Gefühlstones erhalten; die Schmerznerven dagegen haben ihren Namen ausschliesslich nach dem Gefühlston der durch sie ausgelösten Sensationen erhalten, unter Absehen von dem übrigen Empfindungsinhalte — aus sehr natürlichen Gründen. Aber eben dies, dass der Gefühlston hierbei das ausschliesslich Namengebende gewesen ist, hat bewirkt, dass man zu wenig den übrigen Empfindungsinhalt berücksichtigt hat, der doch bei einer gewissen Stärke der Sensation der vorherrschende ist.

Wenn man sich nicht klar geworden ist über den Charakter, den die bei Reizung der sog. Schmerznerven ausgelösten Empfindungen bei einer gewissen Intensität hat, so liegt die Gefahr nahe, verschiedene sowohl von der Haut, wie von den Schleimhäuten ausgelöste Sensationen zu missdeuten; und besonders in dem vorliegenden Falle ist es leicht, die Empfindungen zu missdeuten, die z. B. bei mechanischer punktförmiger Reizung der Haut entstehen. Berührt man, wie Gad und Goldscheider das thaten, die Haut mit einer spitzen Nadel, so erhält man oft schwache, stechende Sensationen, die durchaus nicht mit irgend welchem Schmerz verbunden sind. Durch welche Nerven sind nun diese stechenden, nicht schmerzhaften Sensationen ausgelöst worden?

Eine Deutung, die hierfür nahe liegt, ist folgende. Da wir es ja in dem betreffenden Falle weder mit Wärme-, noch Kälte-, noch Schmerzsensationen zu thun haben, so liegt hier vermuthlich eine Berührungssensation vor, die durch Berührungs- (Druck-) Nerven ausgelöst ist. Dass sie als ein schwacher Stich aufgefasst wird, beruht darauf, dass sie durch einen spitzen Gegenstand bewirkt worden ist. Wir percipiren also, dass eine feine Spitze die Haut berührt oder gegen sie drückt, und fassen also dies als einen schwachen Stich auf, der jedoch nicht schmerzhaft ist, weil die Schmerznerven nicht gereizt wurden.

Indessen ist eine solche Deutung sicherlich irrig. Es dürfte sich im Gegentheil so verhalten, dass die schwachen, nicht schmerzhaften Stichsensationen durch dieselben Nerven ausgelöst werden, die bei stärkerer Reizung die wirklich schmerzhaften, stechenden, brennenden

Sensationen veranlassen, also durch die Schmerznerven, nicht die Berührungsnerven.

Dass diese stechenden Sensationen unabhängig von der Anwendung eines spitzen Gegenstandes sind und daher nicht als von einem solchen bewirkte Berührungssensationen gedeutet werden können, ergiebt sich bei Anwendung meiner Reizlamellen als Schmerzreizmittel. Wenn man mit diesen Reizlamellen, die eine Oberfläche von 4 ^{qcm} haben und auf 100 Grad gehalten werden, die Haut untersucht, so erhält man mit den dünnsten nur Berührungs- und Temperatursensationen, mit etwas dickeren ausserdem eine äusserst feine, stechende Sensation, die für das Bewusstsein nichts mit den eben erwähnten Sensationen zu thun hat: diese stechende Sensation ist durchaus nicht schmerzhaft; erst wenn der Reiz noch weiter verstärkt wird, erhält sie einen unangenehmen Gefühlston, und bei Anwendung noch dickerer Lamellen wird sie schmerzhaft.

Der schmerzhafte Charakter ist indessen hervorgetreten, trotzdem das Reizmittel auf einer Oberfläche von 4 ^{qcm} gewirkt hat. Unter solchen Verhältnissen hat man es offenbar mit Nerven zu thun, deren specifische Energie eben die ist, unabhängig von der Art des Reizmittels, sofern es nur reizend wirkt, Sensationen des eben beschriebenen Charakters auszulösen, eines Charakters, der meines Erachtens am einfachsten und besten durch das Beiwort stechend ausgedrückt wird, wobei die Sensation bei höherer Intensität schmerzhaft ist.

Da die stechenden, nicht schmerzhaften Sensationen, die bei elektrischer und mechanischer Reizung erhalten werden, in allem Wesentlichen mit den durch thermische Reizung bewirkten übereinstimmen, hat man allen Grund, sie als durch dieselben Nerven ausgelöst zu betrachten.

Wiederholt man nun Gad und Goldscheider's Versuche mit mechanischer Reizung und richtet seine Aufmerksamkeit darauf, ob die erhaltenen Sensationen reine Berührungsempfindungen oder stechende Sensationen sind, so findet man in Wirklicheit, dass man bisweilen eine erste Berührungsempfindung erhält, der eine spätere stechende Sensation folgt, und bisweilen eine stechende Sensation, der eine zweite solche folgt. Die erstere dieser Erscheinungen ist, wie oben erwähnt, schon von v. Frey erklärt worden, für die andere dagegen scheinen mir Gad und Goldscheider keine befriedigende Erklärung gegeben zu haben. Es ist diese Erscheinung, bestehend aus zwei der Zeit nach geschiedenen stechenden Sensationen, deren Untersuchung die vorliegende Abhandlung gilt.

[Auch von den Mund- und den Nasenhöhlen werden, besonders

bei chemischer Reizung, Sensationen ausgelöst, die ich in Ermangelung besserer Namen auch fernerhin als kalt stechend bezeichnen will, und die nicht schmerzhaft sind, wenn sie sehr schwach sind, die es aber bei grösserer Intensität werden. Das Freisein dieser Sensationen von Schmerz wird recht gut durch den Umstand beleuchtet, dass sie ganz sicher eine wichtige Componente in den Geschmacksempfindungen darstellen, die verschiedene unserer Gewürze, z. B. Senf und Pfeffer, uns erregen, auch bei Intensitäten, wo diese Empfindungen immer noch angenehm sind. Auch Kohlensäure (in kohlensäurehaltigen Getränken) und Alkohol können angenehme zusammengesetzte Empfindungen geben, von denen diese stechenden Empfindungen einen Bestandtheil ausmachen.]

Um nicht missverstanden zu werden, will ich betonen, dass ich nicht meine, jeder von der Haut ausgelöste Schmerz sei stechend, auch wenn man von dem Charakter absieht, den er durch Beimischung anderer Empfindungen, durch Eigenthümlichkeiten in der Ausdehnung, im Zeitverlaufe u. s. w. erhalten kann. Im Gegentheil tritt bisweilen ein dumpfer Schmerz auf, der durchaus nichts mit Stechen oder Brennen zu thun hat. Es ist mir in der That wahrscheinlich, dass in oder unmittelbar unter der Haut eine weitere Art Schmerznerven sich findet, deren specifische Energie eben die ist, diese dumpfen Sensationen auszulösen.

Die Beobachtungen, die mich zuerst zu dieser Annahme geführt haben, sind folgende.

Wenn man an Hautstellen, wo die Haut die Erhebung sehr kleiner — nur einen oder höchstens ein paar Millimeter hoher — Hautfalten zulässt, z. B. auf der Volarseite des Unterarms nahe der Armbeuge, mit einem pincettartigen Instrumente oder besser vielleicht nur mit den Nägeln eine solche Falte klemmt, so erhält man, ob die Reizung langsam oder schnell ausgeführt wird, Empfindungen, die stechend oder brennend genannt werden können.[1] Wenn man dagegen auf eine grosse in die Höhe gehobene — centimeterhohe — Hautfalte drückt und den Druck auf die Mitte, nicht auf die Biegungskante ausübt, so erhält man bei schwächster Reizung eine dumpfe Sensation. Dasselbe ist der Fall bei präformirten Hautfalten, z. B. den Ohrzipfeln, den Hautfalten zwischen den Fingern u. s. w.; wird der Druck auf die Biegungskante selbst ausgeübt, so tritt eine stechende, brennende Sensation auf; bei Druck über einen dickeren Theil erhält man die dumpfe

[1] Oft glaube ich auch Kälte- und Wärmeempfindungen als in den Sensationen enthalten zu spüren.

Empfindung. Wenn man von der in der Physiologie bisher gebräuchlichen Auffassung ausgeht, dass die verschiedenen Charaktere des Schmerzes nur auf Verschiedenheiten in der Reizungsweise und auf Beimischung anderer Sensationen beruhen, so liegt es nahe sich zu denken, dass die Verschiedenheiten zwischen den Empfindungen bei den beiden verschiedenen Reizungsweisen auch hier so entstanden sind und nicht auf Unterschieden in den specifischen Energien der Nerven beruhen. Hiergegen spricht indessen der eigene Charakter der Sensationen. Sie sind bedeutend von einander verschieden. Hiergegen spricht auch, dass, wie auch der Druck auf kleine geeignete Hautfalten wirke, an diesen stets nur die stechende, brennende Sensation erhalten wird. Beruhte die dumpfe Sensation auf der Reizungsweise, so könnte man ja erwarten, dass sie auch an den kleinen Hautfalten sich zeigte, z. B. wenn die Compression ganz langsam vermehrt wird.

Der Umstand, dass man von den kleinsten Hautfalten nur stechende, brennende Sensationen erhält, spricht weiter dafür, dass die nervösen Bildungen, die den dumpfen Schmerz vermitteln, an tiefere Schichten gebunden sind, und der Umstand, dass, wenn eine grössere Falte einem gleichförmigem Drucke ausgesetzt wird, der schwächste schmerzhervorrufende Reiz nur den dumpfen Schmerz hervorruft, spricht dafür, dass die nervösen Bildungen, die diesen vermitteln, empfindlicher für diese Reizungsweise sind als die, welche den stechenden Schmerz vermitteln, da ja der Reiz diese letzteren mindestens in gleichem Grade treffen muss.

Ebendahin deuten auch die Ergebnisse bei Anwendung anderer Formen mechanischer Reizung und anderer Reizmittel.

Wird die Haut von der lebendigen Kraft eines Gegenstandes von grosser Masse und relativ geringer Geschwindigkeit getroffen — führt man z. B. einen Schlag aus mit einem kautschukbekleideten Perkussionshammer — so erhält man die dumpfe Sensation isolirt. Die brennende wird dagegen isolirt erhalten bei Anwendung von Gegenständen mit geringer Masse und grosser Geschwindigkeit, z. B. mit einer leichten Stahlfeder, die mit grosser Geschwindigkeit, doch ohne die Haut zu beschädigen, gegen dieselbe stösst. Es ist leicht einzusehen, dass im ersteren Falle die Wirkung auf die tieferen Schichten grösser sein muss als im letzteren.

Auch die Ergebnisse bei Anwendung von thermischen, elektrischen und chemischen Reizmitteln scheint mir nach derselben Richtung hinzudeuten.

Wenn der Haut kleine Wärmemengen von hoher Temperatur mittels meiner Reizlamellen — eine Form exquisiter thermischer Rei-

zung (siehe unten) — zugeführt werden, so treten stechende, brennende Sensationen auf. Bei anämischer Haut dagegen, z. B. bei einem Finger, der durch Umwickelung mit Kautschukband anämisch gemacht worden ist, und wo also die schützende Wirkung, die sonst der Blutstrom auf tiefe Schichten ausübt, fortgefallen ist, müssen die Bedingungen für das Erhalten des dumpfen Schmerzes bei thermischer Reizung besser sein. In der That scheint mir die nach einer langen Latenzzeit kommende Schmerzsensation, die in einem anämischen Finger beim Eintauchen in warmes bezw. kaltes, eben Schmerz hervorrufendes Wasser — über 41 bezw. unter 15° — überwiegend den dumpfen Charakter besitzt. Indessen sind die Empfindungen, besonders bei Anwendung von warmem Wasser als Reizmittel, nicht gerade leicht zu analysiren, so dass ich über diesen Punkt mich nicht bestimmt äussern will.

Dafür, dass die dumpfe Schmerzsensation, die von der Haut ausgelöst werden kann, von etwas tieferen Schichten ausgeht, sprechen auch die Ergebnisse bei Anwendung von besonders oberflächlich wirkendem Reiz. Führt man nämlich constante oder Inductionsströme durch sehr spitze Elektroden der Haut zu, so entstehen nur stechende, brennende Sensationen. In diesem Falle muss ja nach den Gesetzen für die Ausbreitung der Elektricität die Stromdichte unmittelbar unter der Elektrodenspitze diejenige in tieferen Schichten so sehr übertreffen, dass bei Anwendung mittelstarker Ströme nur die Nervenenden in den ersteren gereizt werden. Und auch bei chemischer Reizung der in kleinen, oberflächlichen Wunden freigelegten Nerven scheinen, nach der alltäglichen Erfahrung und nach Grützner's (6) Untersuchungen zu urtheilen, vor Allem die Sensationen aufzutreten, die ich hier als stechende, brennende zusammengefasst habe.

Das Auftreten der dumpfen Schmerzempfindung zeigt grosse locale Differenzen. Interessant scheint mir hierbei das Verhalten des Scrotums zu sein. An grösseren Hautfalten desselben, wie sie solchen entsprechen, an denen man anderwärts den dumpfen Schmerz hervorruft, kann man diesen nicht, wenigstens nicht deutlich, hervorrufen, man erhält nur die stechend-brennende Empfindung. In Uebereinstimmung nun mit der höheren Reizschwelle für den brennenden Schmerz bei der hier vorliegenden Form mechanischer Reizung ist — wie übrigens schon Björnström (13) beobachtet hat — das Scrotum ziemlich unempfindlich. Vielleicht deutet dies darauf hin, dass der dumpfe Schmerz an so tiefe Schichten gebunden ist, dass sie im Scrotum nicht repräsentirt wird.

Es ist nicht meine Absicht, zu behaupten, dass die hier vor-

gelegten Beobachtungen entscheidend sind für die Frage nach der Existenz zweier verschiedener Arten von Schmerznerven mit verschiedenen specifischen Energien. Diese Beobachtungen können ja möglicher Weise auch anders gedeutet werden. Aber schon in ihrer jetzigen Form zeigen sie, wie nöthig es ist, dass, sowohl bei physiologischen, wie klinischen Untersuchungen über die Schmerzempfindungen der Haut, wenn überhaupt eine Analyse möglich ist, angegeben wird, ob der Charakter des Schmerzes stechend-brennend, oder dumpf oder aus diesen beiden Empfindungen gemischt ist. Ich betone dies um so mehr, als ich in einer früheren Abhandlung (7), ehe ich die oben mitgetheilten Beobachtungen gemacht hatte, bei dem Versuch, die Reizschwelle für den Temperaturschmerz bei anämischer Haut (dies, um den temperaturausgleichenden Einfluss des Blutstroms zu vermeiden) zu bestimmen, auf diesen Punkt keine Rücksicht genommen und daher möglicher Weise die Reizschwelle für die tieferen Schmerznerven, anstatt für die oberflächlichen bestimmt habe.

2. Das Auftreten zweier Stichschmerzempfindungen bei verschieden angeordneter Wärmereizung.

A. Bei Anwendung 100gradiger Reizlamellen.

Die hier unten mitgetheilten Ergebnisse wurden bei thermischer Reizung der Haut mittels Reizlamellen mit einer Oberfläche von 4 qcm erhalten. Dieselben wurden auf der Temperatur von 100° gehalten, indem sie in einem in leisem Kochen gehaltenen Wasserbade placirt wurden (1. S. 337; 8. S. 385). Die Nummern der Reizlamellen geben deren Dicken in 1000stel Millimetern an.

Bei Anwendung dieser Methode habe ich, wie erwähnt, gefunden, dass unter gewissen Bedingungen nicht nur eine, sondern zwei Stichsensationen auftreten. Davon, dass das Phänomen nicht nur ein individueller oder localer Zufall ist, habe ich mich überzeugt, indem ich sowohl verschiedene Körpertheile (Arm, Bein, Bauch, Brust), als auch verschiedene Individuen untersuchte. Allerdings scheint das Phänomen gewisse individuelle und locale Verschiedenheiten aufzuweisen, im Allgemeinen aber tritt es doch deutlich auf.

Die Art, wie das Phänomen bei verschieden starker Reizung auftritt, ergiebt sich aus dem folgenden Versuchsprotokolle. In demselben ist von den beim Placiren der Lamelle auf die Haut auftretenden Temperaturempfindungen abgesehen worden. Die Untersuchungsstelle war bei diesem wie den meisten anderen Versuchen der linke Unterarm.

Nummer der Reizlamelle	
20	Berührung.
30	Berührung; nach einer Weile eine minimale Empfindung stechenden Charakters.
35	Wie bei 30; „Stich“ etwas stärker.
40	" " " " " "
45	" " " " " "
50	Eine Berührungsempfindung, begleitet von einem „Stich“; nach einer Weile ein zweiter Stich, stärker als der erste.
60	Wie bei 50.
70	Die beiden stechenden, brennenden Empfindungen fangen an, ziemlich stark zu werden. Die erste tritt ungefähr an der Stelle der Berührungsempfindung auf und überdeckt diese.
90	Wie bei 70.
100	Beide Empfindungen sehr stark und nicht so momentan. Die erste beginnt, die Zwischenzeit zwischen beiden in Anspruch zu nehmen. Die zweite immer noch die stärkere.
150	Die brennende Zwischenzeit ist nicht mehr da. An der Stelle der zweiten Empfindung zeigt sich eine starke Anschwellung. Der Schmerz nunmehr sehr unbehaglich.

Bei Anwendung thermischer Reizmittel in dieser Form findet man also, dass die schwächsten Reize eine einzige schwache Empfindung stechenden Charakters entstehen lassen, die bei erhöhter Reizintensität an Stärke zunimmt. Die Empfindung hat eine ziemlich lange Apperceptionszeit. Wird nun die Stärke des Reizmittels noch weiter erhöht, so erhält man zwei derartige Empfindungen, eine schnell sich einstellende und eine mit längerer Apperceptionszeit. Die erstere ist die schwächste, schwächer sogar als die, die als einzige bei etwas gegeringerer Reizstärke erhalten wird. Wird der Reizintensität noch mehr erhöht, so werden beide stärker, ziehen sich in die Länge und fliessen schliesslich zusammen.

Schon hieraus scheint sich zu ergeben, dass die bei schwacher Reizung allein auftretende Schmerzsensation dem zweiten der beiden bei stärkerer Reizung auftretenden „Stiche“ entspricht. Der erste scheint sich vor dem bereits bestehenden einzuschieben. Wie hieraus hervor-

zugehen scheint, könnte man also bei dieser Reizungsart zwischen zwei Serien Stichschmerzsensationen unterscheiden, einer mit niedrigerem Minimum perceptibile, aber längerer Apperceptionszeit, und einer mit kürzerer Apperceptionszeit, aber höherer Reizschwelle.

B. Bei Anwendung anderer Arten thermischer Reizung und anderer Temperaturen.

Wenn man der Haut Wärme zuführt, indem man sie mit einem auf constanter Temperatur gehaltenen, gut wärmeleitenden Gegenstande berührt, z. B. mit einem mit Messingboden versehenen Gefäss, durch das heisses Wasser hinreichend schnell fliesst — ich habe eine solche Anordnung Temperator (s. S. 385) genannt — so findet man, dass das Phänomen je nach der Länge der Berührungszeit sich verschieden verhält. Der Temperator hatte eine kreisrunde Berührungsfläche von 3 cm Durchmesser. Untersuchungsstelle: linker Unterarm.

1. Bei länger andauernder Berührung. Der Temperator wurde auf die Haut placirt und nicht eher entfernt, als bis Schmerz sich einstellte.

Beim Uebergang von niedriger zu höherer Temperatur findet man da Folgendes.

Erst wenn man dem durchströmenden Wasser eine Temperatur von ungefähr 50° giebt (etwas verschieden für verschiedene Stellen, offenbar sehr abhängig von der Dicke der Haut, weshalb sowohl diese wie die folgenden Temperaturangaben einen sehr relativen Werth haben), erfährt man — nach langer Berührungszeit — einen feinen „Stich“. Bei den niedrigsten schmerzhervorrufenden Temperaturen dauert diese Sensation nur kurze Zeit an und verschwindet bald. Bei etwas höherer Temperatur bleibt sie bestehen und nimmt etwas an Intensität zu, ist jedoch durchaus nicht unerträglich. Ihr folgt keine zweite Sensation. Wird die Temperatur über 50° bis zu 56° erhöht, so kommt die stechende Empfindung deutlicher, wird stärker und dauert länger. Auch wenn man den Temperator entfernt, sobald man die Stichsensation wahrnimmt, kommt es nicht zu einer Wiederholung derselben. Bei 56 bis 57·° erhält man zuerst eine schwache stechende Sensation, die sich direct in einer plötzlich anschwellenden, ziemlich stark schmerzhaften Sensation fortsetzt. Ob man augenblicklich nach Auftreten der Sensation den Temperator entfernt, oder ihn weiter behält, eine Wiederholung der Sensation tritt nicht ein. Bei 58 bis 60° kann man, wenn man den Temperator in dem Augenblicke abhebt, wo man die Stichsensation zu fühlen beginnt, möglicher Weise ein sehr kurzes, empfin-

dungsloses Intervall und darauf eine stechende Sensation wahrnehmen. Indessen ist es schwierig, exacte Beobachtungen über das Auftreten der stechenden Schmerzsensation bei diesen Graden zu machen, weil die gleichzeitig vorhandenen starken Temperaturempfindungen die Aufmerksamkeit auf sich ziehen. Auch wenn das durchströmende Wasser über 60° warm ist, bleibt die Doppelsensation aus. Die einzige Andeutung derselben ist, dass der Schmerz, der sich schnell einstellt, nicht ganz gleichmässig steigt, sondern etwas schwach beginnt, um dann plötzlich zu steigen.

2. Bei kürzer dauernder Berührung. Man entfernt den Temperator von der Haut, bevor irgendwie Schmerz sich eingestellt hat. Wenn die Berührungszeit nicht allzu kurz war und der Temperator hinreichend hohe Temperatur besass, so hat er doch so viel Wärme an die Haut abgeben können, dass nach einer kürzeren oder längeren Latenzzeit eine Schmerzempfindung ausgelöst wird.

Man kann entweder allein mit der Hand die Berührungszeit abpassen, oder auch kann man die Sache sich dadurch erleichtern, dass man eine Stahlfeder den Temperator in einer bestimmten Stellung halten lässt. Durch einen mehr oder weniger kräftigen Druck kann man für kürzere oder längere Zeit den Temperator gegen die unter ihm liegende Haut pressen. Sobald der Druck aufhört, federt der Temperator empor.

Bei dieser Untersuchungsweise findet man, dass man mit dem Temperator oberhalb 60° ohne Schwierigkeit die doppelte Schmerzsensation hervorrufen kann. Indessen ist zu diesem Zwecke nöthig, dass die Länge der Berührungszeit richtig abgepasst wird. Ist sie zu kurz, so erhält man entweder keine oder auch nur eine einzige Schmerzsensation. Ist die Berührungszeit zu lang, so wird der Schmerz stark und das Intervall zwischen den beiden Sensationen wird vermindert, oder auch fliessen diese zusammen.

Anstatt eines Temperators kann man jede beliebige Wärmequelle von genügend hoher Temperatur anwenden, sofern sie nur an die Haut eine bestimmte, genügend grosse Wärmemenge in genügend kurzer Zeit, wonach die Wärmezufuhr unterbrochen wird, abgeben kann. Hält man z. B. einen Finger über eine Flamme und passt die Zeit ab, so treten deutlich die zwei Sensationen auf. Am bequemsten und besten gelingt das jedoch bei Anwendung der oben erwähnten Lamellen. Für alle Temperaturen über 60° kann man in der Serie eine Lamelle finden, die möglichst gut die Erscheinung auf der Volarseite des linken Unterarms hervorruft, während dünnere und dickere es weniger gut thun. Je niedrigere Temperaturen man anwendet, um

so dicker muss die Platte sein. Unterhalb 60° tritt die Erscheinung nicht deutlich auf, eine Andeutung davon kann man aber bis herunter zu 58° verspüren.

Dass die Erscheinung bei diesen Reizlamellen so bequem auftritt, dürfte darauf beruhen, dass die Anwendung der verschiedenen Nummern denselben Effect hat wie ein sehr feines Abpassen der Zeit der Berührung mit einem auf derselben Temperatur gehaltenen Gegenstand. Ein und dieselbe Platte führt eine bestimmte Wärmemenge zu, weder mehr noch weniger, während dagegen die geringste Aenderung in den Berührungszeiten, wenn es sich um andere Reizungsweisen handelt, eine Aenderung der zugeführten Wärmemenge herbeiführt, und ohne complicirte Vorrichtungen dürfte eine völlig sichere Abpassung der Berührungszeit schwierig sein.

Stellt man die Ergebnisse, die bei Anwendung von Reizlamellen erhalten wurden, mit den Ergebnissen bei Anwendung constanter Temperaturen zusammen, so kann man den Schluss ziehen, dass zwei Schmerzempfindungen auftreten, wenn bei Anwendung hinreichend hoher Temperatur eine bestimmte Wärmemenge in hinreichend kurzer Zeit der Haut zugeführt wird.

Die verwandte Frage nach dem Verhalten des Phänomens bei Anwendung von Kältereizmitteln habe ich nicht studirt.

3. Die Apperceptionszeiten der beiden Stichsensationen bei thermischer Reizung.

Schon aus dem oben Mitgetheilten geht mit einem gewissen Grade von Wahrscheinlichkeit hervor, dass die bei schwacher Reizung allein sich einstellende stechende Sensation in dem zweiten der beiden bei stärkerer Reizung auftretenden Stiche ihre Entsprechung hat. Dies ergiebt sich noch deutlicher aus den im Folgenden mitgetheilten Reactionsversuchen.

Versuchsmethode.

Bestimmungen der Reactionszeit bei Anwendung thermischer Reizmittel sind vor Allem von Goldscheider (2. S. 312) und von v. Vintschgau und Steinach (19), aber auch von Tanzi (10) und Dessoir (11) angestellt worden. Die drei ersteren hatten die Anordnung benutzt, dass das Temperaturreizmittel — ein Metallgegenstand von wechselndem Temperaturgrad — sowie es die Haut berührt, gleichzeitig mittels eines Hebels auf einen elektrischen Contact wirkt, wodurch der Augenblick der Reizung markirt wird; Tanzi wandte als

Reizmittel theils eine Flamme, theils Aether an, welche Reizmittel zu wirken begannen, sobald ein Deckel niederfiel, der gleichzeitig ein Chronoskop in Gang setzte. Dessoir wandte dagegen bei seinen Untersuchungen keine besondere Vorrichtung an, um den Augenblick zu markiren, wo das Temperaturreizmittel die Haut traf. Seine hier angezogenen Untersuchungen gingen nämlich nur darauf aus, den Zeitunterschied zwischen den Momenten zu bestimmen, wo eine Wärmeempfindung bezw. eine Schmerzempfindung sich einstellte, wenn er genügend warmes Wasser auf die Haut tropfen liess oder einen Finger in derartiges Wasser eintauchte. Zur Markirung dieses Zeitunterschiedes verwendete er ein Chronoskop.

Sowohl v. Vintschgau und Steinach's, wie Goldscheider's und Tanzi's Untersuchungen bezogen sich eigentlich nur auf die Reactionszeiten der Kälte- und Wärmesensationen, aber die von ihnen angewandten Methoden sind natürlich auch anwendbar bei Untersuchungen über die Reactionszeiten des Temperaturschmerzes.

Bestimmungen dieser sind indessen nur in einer geringen Zahl von Fällen ausgeführt worden. Goldscheider theilt einige wenige Werthe mit. Auch Dessoir's oben citirte Untersuchungen über den Zeitunterschied zwischen dem Auftreten der Wärme- und Schmerzempfindungen bei Anwendung von Wärmereizmitteln können ja als eine Untersuchung über die Reactionszeit des Wärmeschmerzes angesehen werden, indem man zu der Differenzzeit die Reactionszeit der Wärmeempfindung addiren kann. Indessen sind die von diesem Forscher erhaltenen Werthe kaum von Interesse für den hier behandelten Gegenstand.

Versuchsmethode bei meinen Untersuchungen.

Um den Augenblick zu markiren, in dem das Wärmereizmittel die Haut traf, wurde über die Haut an der Untersuchungsstelle ein Paar besonders feiner, zu einander parallel laufender Messingdrähte gelegt, die je mit einem Pol einer elektrischen Batterie in Verbindung standen. Der verwendete Strom war so schwach, dass er sich nicht einen Weg durch die Haut zwischen den beiden Metalldrähten bahnte, was daraus zu ersehen war, dass ein in die Stromleitung eingeschaltetes Signal keinen Strom angab, sowie auch daraus, dass in der Haut zwischen den Leitungsdrähten keinerlei Sensation auftrat. Wenn der warme Metallgegenstand die Haut traf, traf er auch gleichzeitig die beiden dünnen, praktisch gesehen im Niveau der Haut liegenden Metalldrähte und schloss den elektrischen Strom. Ein in die Stromleitung eingeschaltetes Signal markirte diesen Augenblick auf einem

rotirenden Cylinder. Das Auftreten der Empfindung wurde von der Versuchsperson mittels eines Morseschlüssels markirt, durch den die Strombahn wieder geöffnet wurde. Der Zeitwerth der Linie zwischen den beiden Marken wurde auf gewöhnliche Weise durch gleichzeitige Aufschreibung von $^1/_{100}$ und $^1/_5$ Secunden bestimmt. Bequemer wäre es natürlich gewesen, ein Hipp'sches Chronoskop anzuwenden. Ein

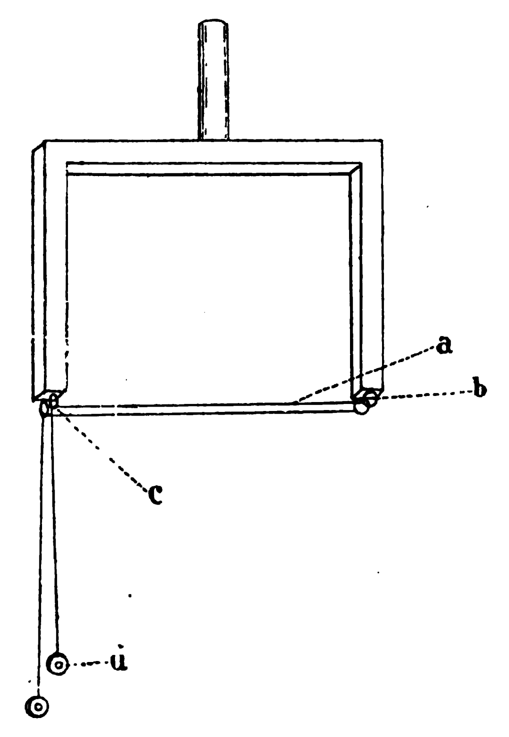


Fig. 1 (sechs Mal verkleinert).

solcher Apparat stand mir indessen nicht zur Verfügung. Damit die angewandten Drähte der Haut auf richtige Weise anliegen sollten, und damit ferner die ganze Vorrichtung leicht auf jeder beliebigen Hautstelle sollte applicirt werden können, wurde die Anordnung benutzt, wie sie aus Fig. 1 zu ersehen ist. Von einem gemeinsamen Querstück gehen zwei Arme herunter. Die Drähte (*a*) sind an dem untersten Theile des einen derselben (*b*) befestigt und stehen dort in Verbindung mit den Polen einer Batterie; sie laufen dann über eine Axe (*c*), die an den unteren Theil des anderen Armes befestigt ist und werden durch ein angehängtes Gewicht *d* in geeigneter Spannung gehalten. Auf

diese Weise befinden sich die Drähte stets parallel zu einander, ohne sich zu berühren, und werden ferner bei richtiger Belastung in geeigneter Spannung gehalten, so dass, wenn z. B. zur Untersuchung des Armes dieser zwischen die abwärtsgehenden Gerüstarme geschoben und die beiden Drähte etwas gehoben werden, diese von selbst sich der Haut dicht anlegen, ohne sich jedoch in sie einzudrücken. Will man die Versuchsstelle wechseln, bringt man eine andere Hautstelle unter die beiden Drähte. Ein solcher Wechsel muss übrigens oft vorgenommen werden, sollen nicht die Versuchsergebnisse durch die von einer früheren Reizung zurückgebliebenen Veränderungen im Wärmebestand der Haut und in der Reizbarkeit der Endorgane getrübt werden. Die Bedeutsamkeit besonders dieses letzteren Momentes ergiebt sich daraus, dass an der Untersuchungsstelle leicht ein brennender Schmerz zurückbleibt.

Die Methode ist besonders einfach und leicht durchführbar und scheint mir auch völlig exact zu sein. Die verwendeten Drähte können mit so geringer Wärmecapacität gewählt werden, dass sie keinesfalls einen nennenswerthen Wärmeverlust für die Wärmequelle herbeiführen können. Wenn ferner das Temperaturreizmittel schnell genug aufgesetzt wird, kann kein nennenswerther Zeitunterschied bestehen zwischen dem Augenblick, da der Strom geschlossen, und dem, da die Haut berührt wird, auch wenn der Messingdraht ein paar Tausendstel Millimeter über die Haut hervorragen sollte. Auf die hier mitgetheilten Resultate kann das in jedem Falle keinen nennenswerthen Einfluss ausüben.[1] Die Methode ist einfacher als die Goldscheider's und v. Vintschgau's und Steinach's und dürfte wohl ganz ebenso genau sein. Die Reactionsstelle war der linke Unterarm.

Versuchsergebnisse.

Die erhaltenen Reactionszeiten ergeben sich aus der Tab. I, in welcher sie nach Tigerstedt's und Bergqvist's Methode (12. S. 24) angeordnet sind. Sie sind also in bestimmte Hauptgruppen einrangirt worden; in unserem Falle umfasst jede Hauptgruppe $^{10}/_{100}$ Secunden; unter 30 sind alle Werthe von $^{26}/_{100}$ bis $^{35}/_{100}$ Secunden zusammengefasst worden u. s. w. In welchem Procentverhältniss die zu einer bestimmten Hauptgruppe gehörigen Resultate zu sämmtlichen Resul-

[1] Nur die letzten Reactionszeitversuche werden nach der eben beschriebenen Methode ausgeführt. Vorher hatte ich eine nach denselben Principien angeordnete, aber nicht so bequeme Methode angewendet.

taten stehen, ist jedoch nicht berechnet worden. Bei einer grossen Anzahl von Versuchen würde sich dieses eigentlich empfehlen.

Unter A wird die Nummer der angewandten Reizlamelle angegeben. Unter B die Anzahl der Reactionszeitversuche, die mit der in derselben Reihe stehenden Lamelle angestellt wurden. Zwischen den A- und B-Columnen finden sich die erhaltenen Werthe in ihre Hauptgruppen nach obenerwähntem Princip einrangirt.

Tabelle I.

A	20/100 Sec.	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	B
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
30	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3	7	4	—	—	14
35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	1	1	1	4
40	—	3	—	1	—	—	—	—	—	1	1	6	—	—	8
50	—	—	—	—	2	—	—	—	—	—	1	1	—	—	2
60	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	1
70	—	—	1	2	—	—	—	—	—	1	2	—	—	—	3
80	—	—	1	1	1	—	—	—	—	1	1	1	—	—	3
90	—	1	2	3	—	—	—	—	2	2	1	—	—	1	6
100	—	1	4	3	—	—	—	1	2	—	—	1	2	2	8
125	—	1	2	2	—	—	—	—	—	—	—	3	2	—	5
150	7	5	6	1	1	—	—	—	2	4	2	8	3	2	20
	7	12	16	13	4	—	—	1	6	13	16	25	7	6	74

Aus der Tabelle geht hervor, dass bei der schwächsten Schmerzreizung mit den 100gradigen Lamellen die Reactionszeit 110 bis 150[1], im Mittel ungefähr 130 beträgt. Bei stärkerer Reizung sinkt die Reactionszeit ganz plötzlich herab auf eine Grösse ganz anderer Ordnung, auf 20 bis 60, im Mittel 40. Gleichzeitig tritt noch immer eine Schmerzreaction zur Zeit der ersteren Reaction auf. Wenn man mit der Lamelle Nr. 40 reizt, ist das Verhältniss nicht in allen Fällen dasselbe. Entweder kommt eine Schmerzreaction nur bei ungefähr 130, oder auch kommt sie bei ungefähr 40, wo ihr dann eine zweite bei 130 folgt. Die zwischenliegenden Werthe sind dagegen nicht repräsentirt. Die Reactionszeit sinkt also nicht mit steigender Reizstärke continuirlich von 130 herunter auf 40, sondern die zwischenliegenden Werthe werden übersprungen.

[1] Die Zahlen bedeuten hier wie im Folgenden immer, wo nichts Anderes gesagt ist, hundertstel Secunden.



Wie aus der Tabelle zu ersehen ist, sind mit der Lamelle Nr. 40 acht Versuche angestellt worden. In der Hälfte derselben traten zwei Schmerzsensationen nach einander auf, in der Hälfte nicht. Die Ursache hierfür dürfte sein, dass die Lamelle Nr. 40 gerade die Wärmemenge hält, die nöthig ist, um die früh auftretende Schmerzsensation hervorzurufen. Wenn die Wärmemenge aus irgend einem Anlass unter dieses Minimum sinkt, so tritt nur die spätere auf. Derartige Anlässe lassen sich viele denken (ein etwas zu grosser Wärmeverlust, wenn die Lamelle aus dem Wasserbade genommen wird, etwas dickere Epidermis auf der einen Stelle als auf der anderen u. s. w.). Dieser Umstand lässt den Schluss zu, dass, auch wenn man die Erscheinung mit noch näher aneinander liegenden Lamellen, als hier gethan wurde, untersuchen wollte, das Resultat dasselbe bleiben würde: dass nämlich entweder eine Schmerzreaction um 130 herum, oder auch zwei solche, eine um 40, eine um 130 herum, ausgelöst werden. Die Zwischenwerthe finden sich nicht vertreten. Bei höheren Wärmemengen scheinen die Reactionszeiten etwas zu sinken. Die Zwischenzeit zwischen den beiden Sensationen scheint recht constant gewesen zu sein, sie betrug im Mittel 87 hundertstel Secunden (Min. 68, Max. 112) oder abgerundet $^9/_{10}$ Secunden.

Um die feineren Details in dieser Sache zu studiren, wäre ohne Zweifel eine grössere Anzahl Versuche erforderlich. Deutlich ergiebt sich jedoch aus den hier mitgetheilten Versuchen, dass die Schmerzsensation bei thermischer Reizung der hier angewandten Art zwei verschiedene Apperceptionszeiten hat, eine längere bei schwacher thermischer Reizung, eine kürzere bei stärkererer Reizung. Auch zeigt sich deutlich, dass die bei schwacher Reizung allein auftretende Sensation in der späteren der bei momentaner, starker Reizung auftretenden beiden Schmerzsensationen ihre Entsprechung hat.

Im Folgenden wird die bei schwacher Reizung allein auftretende und die damit gleichwerthige der beiden Schmerzsensationen die „verzögerte“ oder „späte“, die erste der beiden die „augenblickliche“ oder „frühe“ genannt werden.

Es erhebt sich ungesucht die Frage: wie verhalten sich die Reactionszeiten bei Anwendung anderer als der hier angewandten Reizungsformen? Wenn man von den niedrigsten Temperaturen, die gerade noch Schmerz hervorrufen, aufsteigt zu höheren Temperaturen, zeigt sich da ein ähnlicher Sprung in der Reactionszeit, als wenn man von wärmeärmeren zu wärmereicheren hundertgradigen Lamellen übergeht? Man könnte ja beim ersten Blick fast erwarten, dass, wenn eine ge-

wisse Gradzahl überschritten worden, die Reactionszeit, die vorher relativ lang gewesen, um $^{9}/_{10}$ Secunden sich verkürzte.

Um diese Frage zu beantworten, habe ich eine Reihe von Versuchen angestellt. Als Wärmequelle verwendete ich einen Temperator, zur Markirung des Berührungsaugenblickes diente die oben beschriebene Anordnung. Ich selbst setzte den Temperator auf die Haut. In demselben Augenblicke, wo die Haut berührt wurde, wurde auch der Strom geschlossen und der Reizungsaugenblick markirt. In dem Augenblicke, wo die Schmerzsensation auftrat, wurde der Metallgegenstand abgehoben, so dass auf diese Weise das Auftreten der Sensation markirt wurde.

Diese Anordnung hatte den Vortheil, dass die Berührungszeit nicht länger war als die Reactionszeit selbst, was bei Anwendung hoher Temperaturen bei dem die Haut berührenden Gegenstande von Wichtigkeit war, weil man so den bei längerer Berührungszeit sich einstellenden immer stärkeren Schmerzsensationen entging.

Besonders schien es mir sich zu empfehlen, die Temperaturen zu untersuchen, bei denen, wie vorher festgestellt worden, bei richtiger Abpassung der Berührungszeit oder anders bewerkstelligter Regulirung der zugeführten Wärmemenge eine doppelte Schmerzsensation auftreten kann, die Temperaturen nahe unterhalb und über 60°.

In nachstehender Tabelle finden sich die erhaltenen Werthe nach der Methode Tigerstedt-Bergqvist's geordnet mitgetheilt. Unter A wird die angewandte Temperatur, unter B die Zahl der damit angestellten Versuche angegeben. Zwischen den A- und B-Columnen sind die Werthe in Hauptgruppen nach oben angegebenem Princip geordnet. Unter C finden sich die Mittelzahlen der erhaltenen Werthe.

Tabelle II.

A	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180/100 Sec.	B	C
50°	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3	2	3	1	3	2	—	14	145
52	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	4	2	4	1	2	—	—	—	14	126
54	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	3	9	5	—	—	—	—	18	130
55	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	1	2	8	6	3	—	—	—	21	134
56	—	—	—	—	—	2	1	—	1	1	1	3	1	—	—	—	—	—	10	100
58	—	—	—	—	1	1	3	1	4	—	3	3	1	—	—	—	—	—	17	95
60	—	—	—	—	—	2	3	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	9	72
62	—	—	7	8	11	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	30	45
68	—	2	12	7	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	22	33
	—	2	19	15	12	10	7	5	5	3	10	16	25	15	6	3	2	—		

Wenn der Temperator auf 50° bezw. 52° gehalten wurde, so wurden, gemischt unter die oben angeführten Werthe, auch folgende erhalten, die hier für sich aufgeführt werden.

50°	52°
530	290
455	335
605	245
690	
240	
450	
480	

Betreffs dieser Reactionsversuche ist Folgendes zu bemerken. Sie waren mit grösserer Schwierigkeit verbunden als z. B. die Versuche über die reine Berührungsempfindung. Die Ursache dieser Schwierigkeit liegt darin, dass gleichzeitig mit und vor der Schmerzempfindung auch Temperatur- und Berührungsempfindungen auftreten, weshalb es oft schwierig ist wahrzunehmen, wann die Schmerzsensation beginnt. In diesem Punkte zeigen indessen verschiedene Temperaturen verschiedenes Verhalten.

Bei 50° kommt die stechende Empfindung bisweilen bestimmt, sie setzt gleichsam auf einmal ein, und die Reaction ist dann leicht auszuführen. In gewissen Fällen aber ist bei Anwendung derselben Temperatur schwer zu entscheiden, ob und wann die Stichsensation begonnen hat, und man zögert dann leicht zu lange mit der Reaction. Hat man sich bestimmt sagen können, dass die Reaction zu langsam war, so konnte natürlich der erhaltene Werth verworfen werden. Lange Reactionszeiten kommen jedoch bei 50° bisweilen vor, ohne dass solch ein Grund zur Verwerfung des Werthes besteht. Bei Anwendung von 52° setzt die Empfindung öfter bestimmt ein, und die Reaction ist daher leichter. Auch hier kommt jedoch manchmal die Reaction spät, ohne dass ein Grund vorläge, sie zu verwerfen. Die grösseren Werthe sind hier geringer an Zahl als bei 50°. Bei 54° und 55° geschieht die Reaction verhältnissmässig leicht. Der Stich kommt deutlich und bestimmt. Bei 56 bis 58° ist jedoch die Reaction ausnehmend schwierig; theils treten gleichzeitig mit der stechenden Sensation sehr starke Temperaturempfindungen auf, theils beginnt der Stich äusserst fein, um dann plötzlich zu hoher Intensität anzuschwellen, zu um so höherer, je länger man damit gewartet, den warmen Metallgegenstand abzuheben. Die Intensität des Schmerzes ist so hoch, dass sie starkes Unbehagen verursacht. Da die Aufmerksamkeit oft mehr auf den starken erwarteten

Schmerz, als auf den Beginn der Stichsensation gerichtet wird, da dieser ferner wegen der fortdauernden starken Temperatursensationen etwas verschleiert ist, darf es nicht verwundern, dass auch die hier angeführten Reactionszeiten ziemlich verschiedenartig sind. Möglicher Weise haben auch diese Verschiedenheiten andere Gründe, worüber Näheres weiter unten. Hat man 60° erreicht, so wird die Reaction wieder leichter, der Schmerz tritt bestimmt ein. Die erhaltenen Werthe weisen auch nicht so grosse Verschiedenheiten auf.

Ich gebe gerne zu, dass zahlreichere Versuche erwünscht sind. Dadurch würde man vielleicht zu feineren Details und zu grösserer Sicherheit der Resultate kommen. Aber auch in ihrer vorliegenden Gestalt lassen sie einige Schlüsse zu, wenn man sie mit dem zusammengestellt, was im Uebrigen über Auftreten und Charakter der Empfindungen bei verschiedenen Arten der Reizapplication mitgetheilt worden ist.

Es zeigt sich da zunächst deutlich, dass kein plötzliches Sinken der Reactionszeit bei einem bestimmten Grade eintritt. Von 50 bis 60° sinkt allerdings die Reactionszeit von 145 auf 72 hundertstel Secunden (über den Grund, weshalb ich bei Berechnung der Mittelzahl 145 die längsten Reactionszeiten nicht mitgenommen habe, siehe weiter unten). Aber die Zwischenglieder sind vertreten. Ein so ausgeprägtes und deutliches Sinken wie bei Application der auf 100° erwärmten Reizlamellen kommt hier nicht vor.

Die naheliegende Vermuthung, dass die plötzliche Verminderung der Reactionszeit, welche eintritt, wenn die Reizung mit den hochgradigen Lamellen eine bestimmte Grenze überschreitet, sich auch zeigen würde, wenn der Reiz durch Erhöhung des Wärmegrades verstärkt wird, diese Vermuthung hat sich also nicht bestätigt.

Einer solchen Vermuthung liegt in Wirklichkeit die stille Annahme zu Grunde, dass trotz der Verschiedenheit der Reizmittel, die die Hautoberfläche treffen, die Temperaturänderung in der Schicht der Nervenenden doch dieselbe ist. Da die Consequenzen dieser Annahme sich als unrichtig herausgestellt haben, kann sie selbst nicht aufrecht erhalten werden: die Temperaturänderung in der Schicht der Nervenenden muss bei den beiden Reizungsweisen eine Verschiedenheit darbieten.

Diese Verschiedenheit dürfte in der Geschwindigkeit zu suchen sein, mit der die Temperaturänderung in den beiden Fällen sich vollzieht.

Bei Application der hochgradigen Wärmemenge ist ja der Temperaturunterschied zwischen der Haut und dem berührenden Gegen-

stand grösser als bei der anderen angewandten Reizungsweise; und da nach den Gesetzen für die Wärmeausgleichung unter sonst gleichen Verhältnissen um so mehr Wärme abgegeben wird, je grösser der Temperaturunterschied ist, muss die Haut wenigstens im ersten Berührungsaugenblicke mehr Wärme im ersteren als im letzteren Falle aufnehmen. Andererseits aber ist bei Application der Lamellen die zugeführte Wärmemenge sehr begrenzt, weshalb die Temperatur wiederum schnell sinken muss.

Bei der anderen Reizungsweise, wo die Berührungsfläche constante Temperatur hat, muss der Wärmegrad in der Schicht der Nervenenden immer langsamer sich einem Maximum nähern, das durch die Wärmezufuhr von aussen und den Verlust nach innen bedingt ist. Erst wenn die Wärmequelle entfernt wird, beginnt der Temperaturfall (unter der Voraussetzung, dass man die Beziehungen zwischen Blutstrom und Wärmeleitung in der Haut als constant betrachten darf). Die Temperaturfluctuation ist hier also langsamer, und die Nervenenden brauchen längere Zeit, um die verschiedenen Phasen der Reizung zu durchlaufen. Die Reizung mit einer begrenzten 100-gradigen Wärmemenge liesse sich also vergleichen mit einem schnellen Stoss, die Erwärmung mit einem 50- bis 60 gradigen Gegenstande mit einem langsam wachsenden Druck.

Die Resultate bei Anwendung der 100 gradigen Lamellen haben ergeben, dass für eine bestimmte höhere Reizschwelle die Reactionszeit ungefähr $^9/_{10}$ Secunden kürzer ist als für darunter liegende Reize. Es ist nun klar, dass, je langsamer die Reizungscurve ansteigt und je längere Zeit zwischen dem niedrigeren und dem höheren Schwellenwerthe in der Curve liegt, um so weniger die Reactionszeit durch Erreichung des höheren Schwellenwerthes vermindert wird; denn je längere Zeit der niedere Schwellenwerth diesem höheren vorhergeht, um so mehr wird der Zeitpunkt für die diesem letzteren folgende momentane Empfindung verschoben gegen die verzögerte Sensation hin, die auf den niedrigeren Schwellenwerth nach ungefähr $^9/_{10}$ Secunden folgt.

Beträgt der Zeitunterschied zwischen den beiden Schwellenwerthen in der Curve ungefähr $^9/_{10}$ Secunden, so kann es auf die Reactionszeit keinen Einfluss ausüben, wenn die höhere Reizschwelle erreicht wird. Sollte die Reizungscurve noch weniger steil sein, so muss die Folge offenbar die sein, dass die bisher sog. augenblickliche Sensation später kommt als die „verzögerte“, und sie kann also auch jetzt nicht die Reactionszeit verkürzen.

Aus dem hier Gesagten geht hervor, dass zwei isolirte Schmerzsensationen bei einer einzigen Reizung nicht auftreten können, wenn

die Reizungscurve so langsam steigt, dass der Abstand zwischen den beiden Punkten, die die beiden Schwellenwerthe darstellen, einem Zeitwerthe von annähernd $^9/_{10}$ Secunden entspricht. Noch weniger kann ein empfindungsloses, zwischeneingeschobenes Intervall auftreten, falls der Zeitunterschied zwischen diesen Punkten noch grösser wird; in solchem Falle kann offenbar die Schmerzsensation mit dem höheren Schwellenwerthe nur als eine Verstärkung der bereits vorhandenen Schmerzsensation auftreten.

Aus dieser Erörterung hat sich also ergeben, dass man beim Uebergehen von niederen zu höheren Reiztemperaturen nicht mit Bestimmtheit eine ausgeprägte, plötzliche Senkung in der Reactionszeit erwarten kann; es ergiebt sich auch indirect, dass man aus dem Ausbleiben der doppelten Schmerzsensation nicht den Schluss ziehen kann, der angewandte Reiz habe nicht den höheren Schwellenwerth erreicht.

Die naheliegende Frage, welches die niedrigste Temperatur ist, die diesen Schwellenwerth darstellt, kann daher von dem Mitgetheilten aus nicht mit Bestimmtheit beantwortet werden. Oberhalb 58 bis 60° bei dem berührenden Gegenstande kann er indessen nicht liegen; mit Reizlamellen über 60° kann man ja die doppelte Schmerzsensation hervorrufen, und die Reactionszeit für diese Temperaturen beträgt ja weniger als 1 Secunde; und auf weniger als 1 Secunde kann die Summe aus der Latenzzeit des niedrigeren Schwellenwerthes und die Zeit für die Ausführung der Reaction selbst nicht geschätzt werden.

Einige Worte wären vielleicht nöthig, um die grossen Verschiedenheiten in der Reactionszeit zu beleuchten, die bei Anwendung niedriger constanter Temperaturen erhalten werden. Sie erklären sich gut genug aus der Art und Weise, wie man sich hierbei den Vorgang der Wärmesteigerung in der Schicht der Nervenenden zu denken hat. Nach dem, was wir von den Gesetzen für die Temperaturausgleichung wissen, muss die schnellste Temperatursteigerung während des ersten Berührungsaugenblickes erfolgen, worauf sie dann mit immer geringerer Geschwindigkeit sich vollzieht, bis ganz allmählich der stationäre Zustand erreicht wird, der eine Gleichgewichtslage darstellt, bedingt durch Wärmezufuhr und Wärmeverlust. Wird der Schwellenwerth nicht während des ersten Augenblickes erreicht, sondern fällt er in den langsam ansteigenden späteren Theil desselben, so können die Werthe sehr grosse Verschiedenheiten zeigen. Ein Moment, welches bewirkt, dass die Reizschwelle in diesen langsam ansteigenden Theil der Reizungscurve fällt, muss daher eine bedeutende Verlängerung der Apperceptionszeit bewirken; und kleine Verschiedenheiten in diesen

Momenten müssen grosse Verschiedenheiten in der Apperceptionszeit bewirken können. Eine unbedeutende Aenderung der angewandten Temperatur, ein unbedeutender Unterschied in der Dicke der Hautschicht die die nervösen Bildungen von der Wärmequelle trennt, lassen sich als solche Momente denken. Und dies recht sicher; denn wenn man absichtlich die Einwirkung unbedeutender Aenderungen hierin untersucht, so ist die Einwirkung auf die Reactionszeit frappant. Bei Anwendung von 49° z. B. kann die Reactionszeit oft nach Secunden zählen: 3, 4, 5, 6 Secunden. Bei Application des Reizes auf dickere Haut erreicht die Reactionszeit für 50° dieselben Grössen. Derartige Momente, wie sie nicht ganz und gar vermieden werden konnten dürften wohl die höheren unter den Werthen, die bei Anwendung von 50° und 52° erhalten worden sind, verursacht haben. Ich habe daher, um eine Mittelzahl zu gewinnen, diese ausgeschlossen. Natürlich ist dies nicht ganz genau; das richtige Verfahren wäre gewesen, jedes störende Moment ganz und gar auszuschliessen.

Die Gesichtspunkte, die hier geltend gemacht worden sind, um die grossen Verschiedenheiten in der Reactionszeit der verzögerten Schmerzsensation bei Anwendung sehr niedriger Temperaturen zu erklären, können natürlich auch verwandt werden zur Erklärung der Verschiedenheiten in der Apperceptionszeit der augenblicklichen, bei den Temperaturen, die als niedrig für die Hervorrufung derselben angesehen werden können, nämlich die Temperaturen 56 bis 58°. Mit Rücksicht hierauf wurde oben gesagt, dass die grossen Verschiedenheiten in der Reactionszeit bei den genannten Temperaturen vielleicht einen anderen Grund hätten als die Schwierigkeit, zu beobachten, wann die Sensation begann.

Wenn ich im Vorhergehenden von der Reizschwelle des Schmerzes gesprochen habe, so hat dies nicht der Temperatur in der Schicht der Nervenenden gegolten. Es ist a priori klar, dass diese sich immer etwas unterhalb der auf der Hautoberfläche angewendeten hohen Temperaturen hält; die Veränderungen in der Schicht der nervösen Endorgane ist, wie Goldscheider (2. S. 354) sich ausdrückt, ein Miniaturbild der auf der Oberfläche geschehenden Veränderungen.

4. Auftreten zweier stechender Sensationen bei mechanischer Reizung. Versuche über Reactionszeit.

Wie in der Einleitung erwähnt worden, war eine von Goldscheider bei mechanischer Hautreizung gemachte Beobachtung der Ausgangspunkt für Gad und Goldscheider's Untersuchungen über

die verzögerte Schmerzempfindung. Sie haben dann näher das Verhalten des Phänomens bei mechanischer Reizung und besonders die Latenzzeit der verzögerten Sensation unter dem Einflusse einer Reihe verchiedener Variabler studirt. Sie reizten die Haut mit einer Nadel, und vermittelst einer besonderen Vorrichtung konnte die Intensität und Dauer des Reizes, wie auch die Steilheit der Reizungscurve verändert werden. Sie konnten also einen bestimmten Einfluss der Dauer der Reizung auf das Auftreten des Phänomens constatiren. Eine mittlere Dauer der Reizung von 110 bis 120 tausendstel Secunden stellte bei einer bestimmten Stärke der Reizung und bei mittelsteil ansteigender und abfallender Reizungscurve das Optimum für das Eintreten der Erscheinung dar. Und in diesem Falle betrug die Zeit von dem Schluss der Reizungscurve bis zu dem Moment, wo die Versuchsperson für die verzögerte Empfindung reagirte, ungefähr 1 Secunde. Wenn die Dauer der Reizung 400 bis 500 tausendstel Secunden überschritt, so wurde das Intervall vor der vergrösserten Sensation allmählich kleiner.

Selbst habe ich auch — Anfangs jedoch ohne Zeitbestimmungen anzustellen — die Bedingungen für das Auftreten der beiden stechenden Sensationen theils bei oberflächlicher, theils bei punktförmiger mechanischer Reizung studirt.

Eigenthümlich war es mir schon immer vorgekommen, dass die beiden stechenden Sensationen nicht von den Personen beschrieben worden sind, welche Methoden für die Untersuchung des Schmerzsinnes der Haut mit Hülfe mechanischer Reizmittel ausgearbeitet haben, wo man doch ein Auftreten des Phänomens bei Anwendung derartiger Methoden, die ja Gelegenheit zu bequemer Veränderung der Reizintensität bieten mussten, erwarten konnte.

Um die Sache näher zu studiren, habe ich nach den Principien, die verschiedenen algesimetrischen Methoden zu Grunde liegen, mechanisch die Haut gereizt, aber das Phänomen kommt wirklich in den meisten Fällen nicht zu Stande, ob man nach dem Princip für Björnström's (13) oder Herz und Schlesinger's (14) Methoden eine aufgehobene Hautfalte kneift, oder ob man nach Buch (15. 16), Motschutkowski (17), Philippe oder Kaulbine (18) langsam oder ein wenig mehr stossweise eine mehr oder weniger spitze Nadel gegen die Haut stösst.

In Wirklichkeit ist indessen dieses Verhältniss bei näherem Zusehen nicht erstaunlich. Denn wenn man diese Untersuchungen nicht in ganz besonders schneller Weise ausführt, so darf man annehmen, dass der Druck entweder relativ langsam wächst, oder langsam sinkt.

Uebrigens ist der Schmerz, der hierbei auftritt, oft nicht der stechende Schmerz, um den es sich hier handelt, sondern der dumpfe.

Wenn man dagegen auf die Haut schnell und oberflächlich wirkende mechanische Reize applicirt, so erhält man die beiden stechenden Sensationen ziemlich leicht.

Damit der Reiz schnell wirke, wandte ich Gegenstände an, die die Haut mit grosser Geschwindigkeit treffen und ganz plötzlich ihre Bewegungsenergie an die Haut abgeben, z. B. eine aus ihrer Gleichgewichtslage gebrachte Feder, die beim Zurückfedern die Haut trifft. Damit dabei die stechende, nicht die dumpfe Sensation auftrete, muss der Gegenstand relativ grosse Geschwindigkeit und kleine Masse haben. Zur Anwendung geeignet sind gewöhnliche Claviersaiten von verschiedener Dicke und einigen bis 10 ^{cm} Länge, deren eines Ende irgendwie befestigt ist. Das andere Ende der Feder wird aus der Gleichgewichtslage gebracht und schlägt dann nieder gegen die Haut, die am besten so placirt wird, dass sie von der Feder getroffen wird, wenn diese ihre Gleichgewichtslage erreicht; oder man kann auch platte Federn anwenden, entweder gewöhnliche Uhrfedern oder solche, wie sie bei der Damentoilette verwendet werden und in jedem Kurzwaarengeschäft zu erhalten sind. Damit die Haut in den einzelnen Fällen immer von der gleichen Berührungsfläche getroffen werde, kann man am Ende der Feder eine kleine Platte befestigen. Sie muss indessen äusserst leicht gewählt werden, sonst wird das Resultat dasselbe, als wenn man grosse Masse und kleine Geschwindigkeiten anwendet, d. h. man bringt in erster Linie die dumpfe Schmerzsensation hervor.

Um zu untersuchen, wie sich das Phänomen bei Uebergang von schwacher zu starker Reizung verhält, wandte ich folgenden Apparat an, der eine für diesen Zweck hinreichend genaue Abpassung der Reizstärke erlaubt (s. Fig. 2).

Eine Stalfeder *a* ist an ihrem einen Ende befestigt, an dem anderen frei. Das freie Ende ist gebogen, wie die Zeichnung zeigt, um bequem aus der Gleichgewichtslage gebracht und dann losgelassen werden zu können. Wenn die Feder ihre Gleichgewichtslage einnimmt, erreicht sie gerade die Fläche, auf der die Fussscheibe ruht, welche die Theile des Apparates trägt und zusammenhält. Die Feder wird längs einer Gradscheibe in die Höhe gehoben und dann auf eine bei allen Versuchen gleiche Weise (wozu allerdings einige Vorsicht und Uebung erforderlich ist) losgelassen. Sie trifft dann die darunterliegende Haut mit verschiedener, von der Hubhöhe abhängiger Kraft.

Eine Feder *b* kann in verschiedener Richtung so eingesetzt werden, dass ihr Angriffspunkt auf die Feder *a* verändert wird, wodurch die

Kraft, mit der *a* zurückschlägt, noch weiter vermehrt werden kann. (Die Feder *b* ist in den meisten Fällen entbehrlich.)

Es ist nun klar, dass, je mehr man die Feder aus ihrer Gleichgewichtslage entfernt (ohne indessen einen Bruch oder eine bleibende Deformation derselben herbeizuführen), mit um so grösserer lebendiger Kraft sie die Haut treffen, um so stärker also der Reiz sein wird. Indem man nun die Feder an der Gradscheibe verschieden hoch hebt, kann man leicht constatiren, dass man bei geringster Reizintensität eine reine Berührungsempfindung, bei grösserer Reizstärke eine Berührungssensation, der nach einem Intervall eine Schmerzsensation

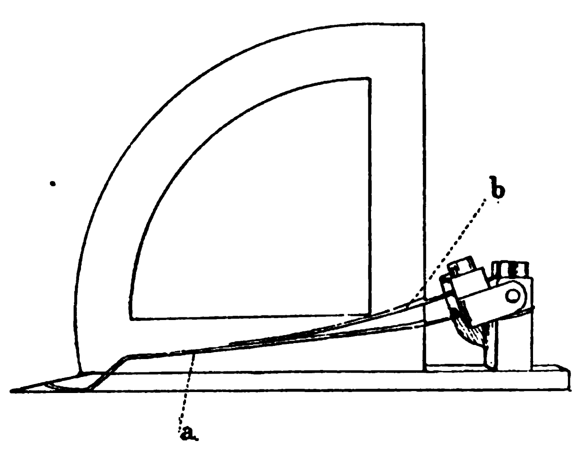


Fig. 2.

folgt, bei noch stärkerer Reizung eine augenblickliche und eine verzögerte Schmerzempfindung erhält. Bei stärkerer Reizung geschieht es oft, dass die späte Empfindung schwächer wird, ja dass nur eine starke „augenblickliche" Empfindung auftritt, die dann ziemlich schnell abnimmt, ohne dass man eine „verzögerte" Sensation wahrnimmt.

Von grosser Wichtigkeit für das Verständniss der doppelten Schmerzsensation ist, wie in dem Folgenden gezeigt werden wird, das Verhalten derselben bei punktförmiger Reizung. Um sichere Resultate zu erhalten, muss — wie ich gefunden — die punktförmige Reizung Gelegenheit bieten, einen bestimmten Punkt auf der Haut nach einander mit verschieden starken momentanen Reizen zu untersuchen.

Methoden, die Haut mit punktförmigen mechanischen Reizen zu untersuchen, die eine exacte Bestimmung der Reizstärke erlauben, finden sich bei Blix (19) und v. Frey (5) angegeben. Ihre Methoden,

die ja zu wichtigen und sicheren Resultaten geführt haben, eignen sich indessen nicht, wenigstens nicht ohne Abänderungen, für meine Untersuchungen. Blix' Methode geht ja eigentlich darauf aus, die Haut mit relativ schwachen Reizen zu untersuchen, und v. Frey's Methode ist allerdings für verschiedene Zwecke sehr bequem, hat aber den Nachtheil, dass die Haare oder Glasfäden (siehe Thunberg [20]), mit denen der punktförmige Reiz zugeführt wird, ungleiche Berührungsflächen haben, weshalb die mit ihnen erhaltenen Werthe beim Uebergehen von schwacher zu starker Reizung nicht ohne Weiteres mit einander vergleichbar sind.

Die von mir für meinen speciellen Zweck benutzte Anordnung ging von der Beobachtung aus, dass, wenn man an einem feinen Faden eine Nähnadel aufhängt und auf eine einfache Weise das Gewicht der Nadel vermehrt oder vermindert, man hierin eine einfache Vorrichtung besitzt, die Haut mit verschiedenen Reizstärken punktförmig zu reizen. Die Nadel wird in den verschiedenen Fällen mit gleicher Geschwindigkeit gegen die Haut geführt, und je nach dem Gewicht der Nadel ändert sich die Reizintensität. Damit die Nadel nicht hin und her schwingt, sondern einen bestimmten Punkt der Haut trifft, lässt man sie durch eine über dem betreffenden Punkte fixirte Röhre gleiten, welch letztere nur so weit ist, dass die Nadel ohne eigentliche Reibung auf und nieder gleiten, während sie gleichzeitig nicht seitwärts schwingen kann. — Die nachstehende Zeichnung giebt eine Vorstellung von der etwas improvisirten Anordnung, in welcher diese Principien zur Anwendung kamen.

Eine sehr spitze, feine Nadel *a* — Figg. 3 und 4 — (Nr. 10, sharp points; die Nadeln im Handel sind meistens gleichförmig numerirt, wie ich erfahre) ist an ihrem oberen perforirten Ende mit Lack an zwei anderen Nadeln *b* befestigt, die in derselben Richtung wie die erstere gehen und zwischen sich einen Zwischenraum von einigen Millimetern (siehe Fig. 4). Oben sind diese Nadeln wiederum durch Lack verbunden und an einem $1^1/_2{}^{dm}$ langen Faden *c* befestigt, der von einem vorspringenden Arm *d* herunterhängt, welch letzterer den einen Schenkel einer Pincette mit starker Feder bildet und hierdurch in einer bestimmten Lage gehalten wird. Drückt man auf den federnden Pincettenschenkel, so senkt sich die Nadelspitze und trifft einen bestimmten Punkt auf dem unterhalb der Nadel placirten Hautbezirk. Sobald der Druck zufhört, wird die Nadel durch die Federkraft wieder in die Höhe gehoben. Damit die Nadel nicht hin und her schwingt oder seitwärts gleitet, und damit man sicher und bequem einen bestimmten Punkt treffen kann, gleitet die Nadel möglichst reibungslos

in einer kleinen Röhre *e*, die an einem Arm desselben Stativs befestigt ist, wie der Draht, von welchem der Arm herunterhängt.

Um den Druck der Nadel gegen die Haut bequem ändern zu können, wird die Belastung derselben durch einen Hebel *f* vermittelt, welcher um eine Axe *g* drehbar ist (die Axenvorrichtung in der Zeichnung nicht deutlich sichtbar). Der Hebel ist durch ein Gewicht *h* äquilibrirt, das nahe der Axe placirt ist, um Schleuderbewegungen zu

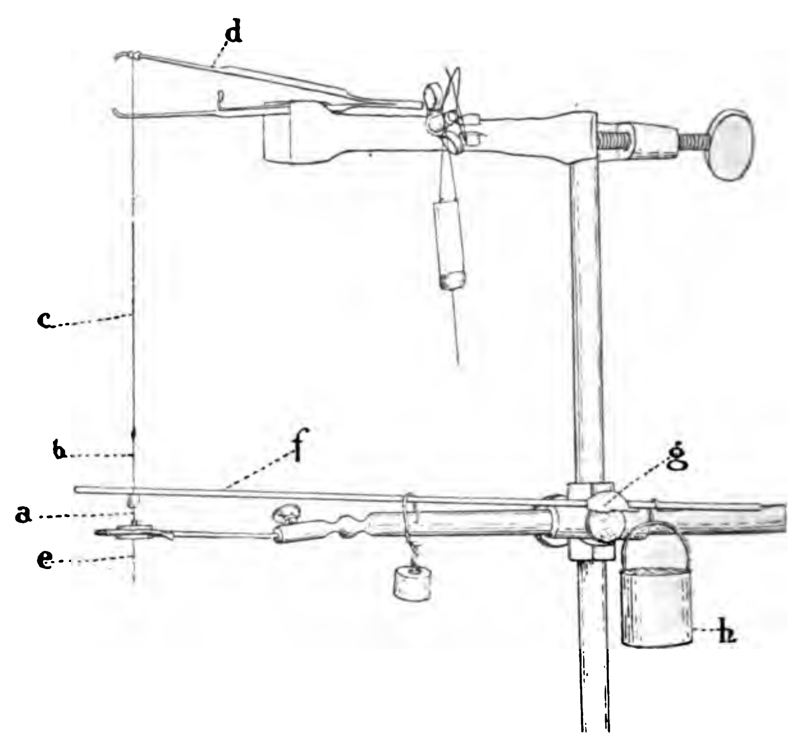


Fig. 3.

vermeiden. Der Hebel ist in den Zwischenraum zwischen den beiden oberen Nadeln eingefügt und ruht also auf dem Lack, der sie unten zusammenhält. An dem Hebel können Gewichte aufgehängt werden. Er ist so angeordnet, dass er möglichst horizontal liegt, wenn die Nadel die Haut trifft.

Wenn der Hebel beschwert ist, lastet er also auf dem Nadelsystem in verschiedenem Grade, je nach der Grösse des belastenden Gewichtes und seinem Platz am Hebel. Durch Aenderung dieses Platzes kann die Belastung leicht variirt werden. Der auf die Nadel

selbst wirkende Theil des Gewichtes wird aus der Länge der Hebelarme berechnet. Der Druck, den die Nadel gegen die Haut ausübt, wird allerdings etwas durch die Reibung in der Röhre vermindert. Da indessen diese sehr unbedeutend ist — die Resultate bleiben ungefähr dieselben, auch wenn die Nadel frei hängt — da ferner nicht so sehr die absoluten Werthe, als vielmehr die relativen von Bedeutung für die vorliegende Untersuchung waren —, so hat dies keinen Einfluss auf die Anwendbarkeit der Versuchsanordnung. Um die Belastung der Nadel zu ändern, wandte ich auch eine an der Nadel befestigte Papierröhre an, die mit Bleischrot gefüllt werden konnte (*i*). Die Hebelmethode war jedoch bequemer.

Eine Untersuchung mittels dieses Apparates, der sicherlich in vieler Hinsicht leicht verbessert werden könnte, geht auf folgende Weise vor sich. Die Hautstelle wird einige Millimeter unterhalb der Nadelspitze placirt; man drückt den Arm nieder, der den Draht trägt. Die Feder wird niedergedrückt, die Nadel, belastet durch den Hebel, senkt sich, trifft die Haut und ruht in dem Augenblicke, wo der Faden schlaff wird und sich krümmt, auf der Haut. Da der Reiz möglichst momentan sein muss, so hört man nun sofort mit dem Druck auf den Aufhängungsarm auf; die Feder hebt sofort die Nadel von der Haut ab. Man ändert die Belastung an dem Hebel und wiederholt den Versuch. — Der Abstand der Nadel von der Haut darf natürlich nicht so gross sein, dass sie, wenn sie die Haut trifft, mit ihrem Kopf sich auf den oberen Rand der Gleitröhre auflehnt. Man lernt es leicht, die Nadel stets mit gleicher Geschwindigkeit zu senken. Die Ungleichheiten hierbei, die nicht zu vermeiden sind, wirken nicht nennenswerth auf die erhaltenen Werthe ein, wovon man sich leicht durch die Resultate bei den verschiedenen Versuchen überzeugt.

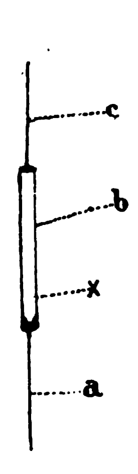


Fig. 4.

Ich habe es daher für unnöthig und überflüssig angesehen, eine Vorrichtung anzubringen, die eine constante Senkungsgeschwindigkeit ermöglicht.

Die Nadel sammt den daran befestigten Apparattheilen ist so leicht (ungefähr 150 mg), dass nur eine schwache Berührungsempfindung entsteht, wenn die Nadel langsam auf die Haut herabgesenkt wird.

Untersuchungsstelle: Dorsalseite der Hand und der Finger.

Wenn man auf diese Weise eine grössere Anzahl Punkte hinsichtlich der Empfindungen untersucht, die auftreten, wenn man von ge-

ringerer zu grösserer Belastung des Nadelsystems fortschreitet, so findet man, dass die verschiedenen Punkte sich verschieden verhalten.

Ein Theil der untersuchten Punkte veranlasst nur eine Berührungsempfindung, auch wenn man die Belastung so vermehrt, dass die Nadel in die Haut eindringt, eine Thatsache, auf die bereits Blix hingewiesen hat.

Diejenigen, die überhaupt eine Schmerzempfindung verursachen, zeigen verschiedenes Verhalten.

1. Von einigen Punkten erhält man bei etwas stärkerer Reizung eine Berührungsempfindung, der nach einem empfindungslosen Intervalle eine stechende Sensation folgt. Wird die Reizstärke noch mehr erhöht, so tritt an der Stelle der Berührungsempfindung eine Stichsensation auf, welche die erstere überdeckt; nach einem Intervall folgt wiederum eine Stichsensation.

2. Andere Punkte verhalten sich insofern diesen gleichartig, als man von ihnen eine Berührungsempfindung erhält, der nach dem typischen Intervall eine Stichsensation folgt. Wird der Reiz weiter verstärkt, so tritt wie vorher an die Stelle der Berührungsempfindung eine Stichsensation, aber die spätkommende Stichsensation fällt fort.

3. An anderen Punkten wieder folgt der bei schwacher Reizung auftretenden Berührungsempfindung bei stärkerer Reizung — und man muss dabei die Reizstärke bedeutend erhöhen — eine Stichsensation am Orte der Berührungsempfindung. Eine verzögerte Sensation ist nicht wahrzunehmen.

Um die verzögerte Stichsensation hervorzurufen, muss das Gewicht des Nadelsystems mindestens 500 bis 1000^{mg} betragen. Die frühe Stichsensation erfordert mindestens 3000 bis 5000^{mg}, also 3 bis 10^{g} grössere Belastung, und hierbei dringt im Allgemeinen die Nadel etwas in die Haut ein. Man merkt dies theils daraus, dass manchmal eine unbedeutende Menge Flüssigkeit, manchmal etwas Blut hervorsickert, theils und meistens daraus, dass die Nadel etwas in der Haut haftet.

Es zeigt sich also klar, dass die verzögerte Schmerzsensation an gewisse Punkte, die empfindlichsten, gebunden ist, also an v. Frey's Schmerzpunkte. Nur hier kann die doppelte Schmerzempfindung hervorgerufen werden.

Die späte und die frühe Stichsensationen sind einander nicht ganz gleichartig. Abgesehen von der Verschiedenheit, die dadurch bedingt ist, dass die frühe fast stets mit einer Berührungsempfindung vermengt ist, ist die verzögerte auch nicht so momentan und hat einen Charakter, von dem ich, um ihn zu verdeutlichen, sagen möchte, dass er voller ist als der der augenblicklichen.

Reactionszeitversuche.

Betreffs des Zeitunterschiedes zwischen den beiden Sensationen, die bei punktförmiger mechanischer Reizung auftreten, habe ich einige Reactionszeitversuche angestellt. Aehnliche Versuche sind allerdings schon von Gad und Goldscheider ausgeführt worden, welche, wie erwähnt, bei wechselnder Intensität und Dauer des Reizes und wechselnder Steilheit der Reizungscurve die Zeit bestimmten von dem Augenblick, wo die Reizung aufhörte, bis zu dem Augenblicke, wo die Reaction für die secundäre Sensation gemacht wurde. Betreffs der von ihnen erhaltenen Werthe sei auf ihre Abhandlung verwiesen. Die hier mitgetheilten Reactionsversuche erlauben indessen einige weitere Schlüsse, da hier zwischen den beiden Erscheinungen unterschieden werde: 1. eine frühe Berührungs- und eine späte Stichsensation; 2. zwei der Zeit nach getrennte stechende Sensationen. Die Versuchsanordnung war folgende:

Mitten durch den Boden einer leichten Schachtel aus dünner Pappe *a* ging eine feine Metallröhre *b* (ein Stück einer feinen Spritzen-

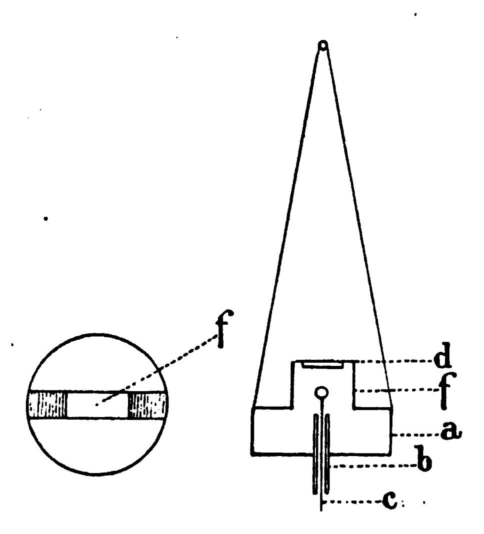


Fig. 5.

spitze), die mit Wachs an der Schachtel befestigt war und nach oben und unten hervorragte, wie die Fig. 5 es zeigt. Eine feine Nähnadel *c* (Nr. 10, sharp points) hing durch diese Röhre hinab, wurde aber durch einen Knopf von Siegellack am Hinabgleiten verhindert; der Knopf liess an dem obersten Theile der Nadel eine Metallfläche frei. $^1/_2$ cm oberhalb der Nadel war eine dünne Metalllamelle *d* an der Unterseite

einer über der Schachtel sich erhebenden Brücke *f* befestigt, welch letztere fest mit der Schachtel zusammenhing. Wenn die Nadel durch die Röhre hinaufglitt, stiess sie schliesslich gegen die Metalllamelle Die Schachtel war mittels vier oben zusammengeknüpfter Fäden an einem Haken aufgehängt. Von dem obersten Theile der Nadel und von der Metalllamelle gingen ausserordentlich feine Messingdrähte aus so fein, dass sie das Gleiten der Nadel in der Röhre oder das Niedersetzen oder Aufheben der Schachtel nicht hinderten. Diese Drähte machten einen Theil der Stromleitung von einer Batterie aus. Der Strom wurde geschlossen, sobald die Nadel in die Höhe schoss und gegen die Lamelle stiess.

Der Haken hing an einem Hebelarm, der mit einer Feder in einer bestimmten Stellung gehalten wurde; ein Druck auf den Hebel senkte die Schachtel; hörte der Druck auf, erhob sie sich wieder. Durch diesen Hebel erhielten Senkung und Hebung des Apparates die nöthige Regelmässigkeit.

Wurde der Apparat auf die Haut aufgesetzt, so wurde diese zunächst von der Nadelspitze getroffen. Die Nadel glitt so leicht in ihrer Röhre und war so leicht (35^{mg}), dass keine Sensation dabei auftrat (auf der Dorsalseite der Hand). Erst wenn der Apparat noch weiter gesenkt wurde und die Nadel gegen die Metalllamelle stiess, und plötzlich das Gewicht der Schachtel, die manchmal noch besonders belastet war, zu tragen bekam, wirkte die Nadel als Reizmittel. In demselben Augenblicke wurde der Strom geschlossen. Die Sensationen wurden auf gewöhnliche Weise markirt.

Sicherlich hätte der Apparat unter Beibehaltung der hier angewandten Principien sehr verbessert werden können. Indessen hat er schon in dieser Form ziemlich gleichförmige Werthe gegeben.

Wenn die Belastung der Nadel $1 \cdot 75^{g}$ betrug, so wurde auf gewissen Punkten eine frühe Berührungs- und eine späte Stichsensation erhalten; wurde die Nadel mit 5^{g} belastet, so wurden auf einer Reihe von Punkten die beiden stechenden Sensationen erhalten. Nur diese beiden Kategorien von Ergebnissen sind hier berücksichtigt, die oft sich einstellenden Ergebnisse anderer Art (siehe den oben gegebenen Bericht) weggelassen worden.

Das Ergebniss der Reactionsversuche (12 von jeder Art) war, dass die Reactionszeit für die erste Berührungsempfindung im Mittel 21 (überall sind hier hundertstel Secunden gemeint) — Min. 12, Max. 35 — betrug, wonach im Mittel 88 — Min. 80, Max. 103 — bis zur Reaction für die stechende Sensation verflossen. Die Reaction für die frühe Stichsensation wird im Mittel nach 18 (Min. 14, Max. 20) aus-

geführt, wonach bis zur Reaction für die zweite Stichsensation im Mittel 96 hundertstel Secunden (Min. 85, Max. 102) verfliessen.

Diese Versuche sind allerdings nicht zahlreich, aber sie scheinen mir demungeachtet einige Schlüsse zuzulassen. Sie zeigen, worauf bereits die directe Beobachtung hindeutet, dass die bei schwacher Reizung allein auftretende Stichsensation in der zweiten der bei genügend starker Reizung auftretenden beiden Stichsensationen ihre Entsprechung hat. Sie zeigen ferner, dass der Zeitunterschied zwischen der frühen und der späten Sensation hier der gleiche ist wie bei thermischer Reizung. Der unbedeutenden Differenz, die der Zeitunterschied zwischen der frühen und der späten Sensation aufweist, je nachdem die frühe eine Berührungs- oder eine Stichsensation ist (88 bezw. 96), darf bei der geringen Zahl der Versuche kaum Bedeutung beigelegt werden.

5. Auftreten zweier stechender Empfindungen bei elektrischer Reizung.

Wie schon in der Einleitung erwähnt, haben Gad und Goldscheider eingehende Untersuchungen über das Verhalten der späten Schmerzsensation bei Anwendung von Inductionsschlägen in verschiedenem Rhythmus und verschiedener Zahl, wie auch über die Latenzzeit dabei angestellt. Sie haben dagegen keine Untersuchungen über das Verhalten des Phänomens bei besonders abgepasster punktförmiger Reizung angestellt, Untersuchungen, die mir für die richtige Deutung des Phänomens von grösstem Gewicht zu sein scheinen (siehe weiter unten); auch haben wir nicht die Verhältnisse bei Anwendung kurzdauernder constanter Ströme untersucht.

Die hier unten mitgetheilten Untersuchungen beziehen sich vor Allem auf diese von Gad und Goldscheider nicht untersuchten Verhältnisse.

Die Untersuchung wurde theils auf der Dorsalseite der Hand und der Finger, theils auf der Volarseite der Finger angestellt. Zumeist benutzte ich Hautstellen an den Fingern, weil dort applicirte elektrische Reize bei Vermehrung der Reizstärke nicht so bald störende Muskelzuckungen veranlassen.

Die eine Elektrode war indifferent und bestand aus einem grossen, mit angefeuchtetem Fliesspapier bedeckten Kupferblech; sie lag meistens der Innenfläche der Hand an. Die andere Elektrode bestand aus einer spitzen Nadel.

Bei den ersten Versuchen wurde die Nadel auf irgend eine Weise mit der Haut in Berührung gebracht. Ich fand indessen bald, dass je nach dem Druck, den die Nadel gegen die Haut ausübte, die Wir-

kung der Ströme ganz verschieden war. Es war ferner schwierig, während der Versuche mit wechselnder Reizstärke die Spitze der Nadel unverrückt auf derselben Stelle zu halten. Mit dem Apparate, wie er eben für die Erzeugung punktförmiger mechanischer Reizung beschrieben worden ist, konnte ich allerdings diese Schwierigkeiten recht gut überwinden. Die Nadel wurde nämlich bei dieser Anordnung mittels eines äusserst feinen Leitungsdrahtes in den Stromkreis eingeschaltet und diente so als Elektrode. Ich fand es jedoch bald am bequemsten, die Nadel in der Epidermis durch einen unbedeutenden langsamen Einstich in schräger Richtung zu fixiren, was meistens ohne jeden Schmerz geschehen konnte. Zuweilen gab es einen stechenden Schmerz, wenn die Nadel eben eingeführt wurde. Nie indessen durfte die Nadel anhaltenden brennenden Schmerz verursachen. War das der Fall, wurde eine neue Stelle gewählt. Da die Epidermis ein besonders schlechter Leiter ist, darf man wohl annehmen, dass die Ströme vor Allem von dem tiefstliegenden Punkte der Nadel, also der Spitze, aus ihren Weg suchten, und dass also der unter der Spitze liegende Punkt in erster Linie gereizt wurde. Wie dem auch sei, so müssen doch bei wiederholter Reizung, wenn die Nadel nicht aus ihrer Lage gebracht wird, dieselben Theile gereizt werden.

a) Einfache Inductionsschläge.

Bei den Versuchen mit einfachen Inductionsschlägen wurden folgende Resultate erhalten, sei es, dass nur Oeffnungs- oder Schliessungsinductionsschlag angewendet wurde, sei es, dass der active Pol Kathode oder Anode war.

Ging man von schwachen zu starken Inductionsschlägen über, so trat zuerst eine schwache Berührungsempfindung auf. Bei stärkeren Inductionsschlägen trat an der Stelle der Berührungssensation eine Schmerzempfindung auf, die also der oben beschriebenen augenblicklichen Schmerzsensation entsprach. Bei vermehrter Stärke verhielten sich die verschiedenen Punkte verschieden. Ich übergehe dabei völlig die eigenthümlich pickenden Empfindungen und eine bisweilen auftretende dumpfe Sensation, um mich nur an die stechende, brennende Sensation zu halten. Auf den meisten Punkten konnte man von der verzögerten Schmerzempfindung nichts merken, wie starke Inductionsschläge auch angewandt wurden. Auf anderen hingegen trat sie auf, meistens undeutlich und sehr schwach, auf einem und dem anderen Punkte, aber ziemlich selten, völlig deutlich, wenn auch relativ schwach im Verhältniss zu der ersten, die immer die stärkere war. Auch wenn man bis zu sehr starken Inductionsschlägen hinauf ging, war die späte

Sensation nicht so deutlich wie bei mechanischer oder thermischer Reizung.

Bei dieser Art von elektrischer Reizung zeigt sich also ein umgekehrtes Verhältniss betreffs des Auftretens der frühen und der späten Schmerzsensation, im Vergleich mit dem Verhältniss bei thermischer und mechanischer Reizung, wo ja die späte Sensation schon bei schwächster Reizung auftritt.

Ich bin also bezüglich der Wirkung einfacher Inductionsschläge zu dem entgegengesetzten Resultate gekommen wie Gad und Goldscheider. Diese betonen auf das Bestimmteste, dass keine Andeutung einer Secundärempfindung bei einfachen Inductionsschlägen auftritt und haben ja auch ihre Deutung des Phänomens auf diese ihre Ansicht gegründet. „Für die Erklärung des Phänomens der secundären Empfindung ist nun von grundlegender Bedeutung, dass dieselbe vollkommen fehlt, wenn ein einzelner Oeffnungsschlag auf die Haut applicirt wird" (1. S. 342). Ich möchte indessen bemerken, dass ich nicht finden kann, dass ihre Erklärung des Phänomens mit der Abwesenheit der Secundärempfindung bei einem einfachen Inductionsschlage steht oder fällt. Wenn ich (siehe unten) von ihrer Erklärung abweichen muss, so geschieht das aus anderen Gründen.

Die Ursache für diese Verschiedenheit der Resultate liegt vielleicht in der Art, wie die Elektroden applicirt werden. Bei jenen waren sie auf der Haut placirt, bei meinen Versuchen waren sie in die Haut eingestochen. In der That beobachtete ich das Phänomen völlig deutlich erst, seitdem ich diese Applicationsweise anwandte. Indessen habe ich eine Andeutung davon auch bei der ersteren verspürt. Die Elektroden bei Gad und Goldscheider waren nicht so spitz wie die meinen, und auch dieses wirkt auf das Auftreten der Erscheinung ein, wie ich bei Anwendung verschieden spitzer Elektroden gefunden habe. Die Erklärung liegt vermuthlich darin, dass bei gröberen Elektroden die brennende, stechende Sensation nicht so deutlich und so isolirt auftritt.

b) Serien von Inductionsschlägen.

Die Methode, die ich anwandte, um Serien von Inductionschlägen von verschiedenem Rhythmus und verschiedener Zeitdauer zu erhalten, war principiell dieselbe wie die von Gad und Goldscheider angewandte.

Als ein für die Deutung unseres Phänomens wichtiges Resultat ergab sich hierbei, dass verschiedene Punkte sich ganz verschieden verhalten. Auf einigen Punkten wurde eine späte Stichsensation völlig

deutlich erhalten, auf anderen schwach, auf wieder anderen überhaupt nicht, während die primäre Sensation wohl in allen Fällen von gleicher Intensität war.

c) Kurzdauernde constante Ströme.

Die Dauer der Ströme wurde durch ein Pendel mit einem Stahldrahtarm regulirt, welch letzterer beim Schwingen des Pendels in ein Quecksilbergefäss eintauchte und so den elektrischen Strom schloss. Durch Aenderung der Schlaganzahl des Pendels aus der Höhe des Quecksilbers konnte dem Strome eine Dauer von $^1/_{20}$ bis $^2/_5$ Secunde gegeben werden. Die Stromstärke wurde auf bekannte Weise durch Einschaltung von Widerständen in eine Nebenleitung und Anwendung einer wechselnden Zahl von Batterien geändert.

Sei es, dass man Kathode oder Anode als differenten Pol anwandte, so ergaben sich folgende Resultate. Ging man von schwachem zu starkem Strom über, so trat zunächst eine Berührungsempfindung auf. Wurde die Stromstärke vermehrt, so trat eine Stichsensation an der Stelle der Berührungsempfindung auf. Wurde die Stromstärke noch weiter vermehrt, so zeigten verschiedene Punkte verschiedenes Verhalten. Auf einigen trat die späte Empfindung überhaupt nicht auf, auf anderen trat sie schwach auf, auf wieder anderen besonders stark und deutlich.

Auf das Auftreten der doppelten Schmerzsensation schien hierbei die Zahl der an derselben Stelle angestellten Versuche, wie auch die Dauer des verwendeten Stromes einen gewissen Einfluss ausüben.

Wenn derselbe Punkt mehrere Male hinter einander mit derselben Stromstärke gereizt wurde, so geschah es nämlich, dass, wenn die Secundärempfindung die ersten Male überhaupt nicht oder nur schwach auftrat, sie nach wiederholter Reizung auftrat bezw. verstärkt wurde.

Auch die Dauer des Stromes erwies sich als von Einfluss in derselben Richtung, indem, wenn die späte Empfindung bei den kürzer dauernden Strömen überhaupt nicht oder nur schwach auftrat, sie auftrat bezw. verstärkt wurde, wenn der Strom länger dauerte.

6. Erklärungsversuch.

Wie soll man dieses Auftreten zweier Schmerzempfindungen bei einer einzigen momentanen Reizung erklären?

Verweilen wir zunächst bei den mechanischen und thermischen Reizen.

Es ist oben gesagt worden, dass, wenn man bei momentan wir-

kenden mechanischen und thermischen Reizen eben das Minimum perceptibile überschreitet, man nur die verzögerte Schmerzsensation erhält.

Wie ist diese Schmerzsensation zu Stande gekommen?

Man hat früher zu der Annahme geneigt, dass Schmerz auftritt, wenn der die Haut treffende Reiz so stark ist, dass die Haut beschädigt und der Nerv direct gereizt wird. Naunyn (3. S. 287) sagt z. B.: „Alle die Eingriffe, welche beim normalen Individuum Schmerz erzeugen, sind derart, dass man ihnen eine Einwirkung auf die Nervenfaser zutrauen darf, durch welche der organische Zustand dieser verändert wird.“

Bei näherem Studium der Sache hat man indessen gefunden, dass Schmerz durch so schwache Reize ausgelöst werden kann, dass ihnen eine directe Verletzung des Nerven nicht zugeschrieben werden kann, Reize, die zu schwach sind, um als allgemeine Nervenreize angesehen zu werden.

Um unter solchen Verhältnissen zu erklären, dass eine Nervenreizung zu Stande kommt, hat v. Frey (5. S. 261) die, wie mir scheint, recht annehmbare Ansicht ausgesprochen, dass das mechanische Reizmittel einen Zwischenprocess verursacht, wahrscheinlich einen solchen chemischer Natur. Möglich, dass eine Aenderung in der Concentration der Flüssigkeit bewirkt wird, die diese Nervenendigungen umgiebt, sei es so, dass Flüssigkeit geringeren osmotischen Druckes aus den Zellen des Rete Malpighii austritt, oder auf andere Weise, deren Ergebniss das wäre, dass das osmotische Gleichgewicht zwischen dem Nervenende und der es umgebenden Flüssigkeit geändert und der Nerv dadurch gereizt wird.

Wie es sich mit den näheren Einzelheiten auch verhalten möge, sehr wahrscheinlich ist also, dass die mechanische und thermische Reizung einen Zwischenprocess verursacht, der seinerseits die Nervenreizung vermittelt.

Die Bildungen, in denen dieser Zwischenprocess sich abspielt, können vom physiologischen Gesichtspunkte die Endorgane der betreffenden Nervenfäden genannt werden, besonders wenn sie — was jedoch nicht wahrscheinlich ist — durch in Verbindung mit dem Nerv stehende und ausschliesslich ihm zugehörige morphologische Bildungen, also Endorgane im histologischen Sinne, repräsentirt werden, aber auch wenn sie nur in einer Strukturdifferenziirung im Nervenende selbst bestehen, oder auch wenn sie nur durch die specielle Lage der Nervenenden repräsentirt werden, welche die Entstehung eines Reizung des Nerven nach sich ziehenden Zwischenprocesses bedingen kann (siehe Thunberg 8. S. 420). Man kann also vom physiologischen Stand-

punkte aus sagen, dass die betreffenden Nerven Endorgane besitzen, die die Empfindlichkeit also für diese schwachen mechanischen und thermischen Reize bedingen, eine Empfindlichkeit, die möglicher Weise als auf dem Wege der Anpassung entstanden gedacht werden kann, da ja diese Reize primär im Leben des Individuums vorkommen und ein 'Vermeiden derselben wohl manchmal nützlich erscheinen könnte.

Die Nervenenden zeigen nun für diese schwachen thermischen und mechanischen Reize, wie aus diesen Untersuchungen sich ergeben hat, eine bei momentaner Reizung ihrer Dauer nach bestimmte, ziemlich lange Latenzzeit. Die Sensation wird also bei diesen schwachen Reizen verzögert.

Wenn der Reiz eine gewisse Stärke überschreitet, wird nun, wie diese Untersuchungen gezeigt haben, ganz plötzlich die Reactionszeit verkürzt, und die Schmerzsensation kommt augenblicklich.

Ich halte es für sehr wahrscheinlich, dass dieses geschieht, sobald der Reiz eine solche Stärke erreicht hat, dass er direct reizend auf den Nerv oder das Nervenende wirkt, ohne dass ein Zwischenprocess nöthig ist, weshalb hier die Apperceptionszeit der Sensation um die Zeit für den Zwischenprocess vermindert wird.

Indessen ist zuzugeben, dass ein strenger Beweis nicht dafür vorliegt, dass diese Verkürzung der Apperceptionszeit sich gerade dann einstellt, wenn der Reiz die Grenze zum allgemeinen Nervenreiz passirt hat.

Die Werthe, die betreffs der Reizbarkeit von Nerven gegenüber mechanischen Reizen gefunden worden sind, lassen keinen Vergleich mit denen zu, die ich als Minimalwerthe für die Hervorrufung der augenblicklichen Sensation erhalten habe. Auch sind keine Bestimmungen vorhanden bezüglich der geringsten Wärmemengen, durch die ein Nerv gereizt wird.

In Uebereinstimmung mit dieser Deutung der Entstehung der augenblicklichen Sensation steht indessen der Umstand, dass sie nicht an die empfindlichsten Punkte der Haut gebunden ist, sondern auch auf zwischen diesen liegenden Punkten, wo überhaupt Schmerz ausgelöst werden kann, auftritt.

Aber auch der kräftig wirkende Reiz verursacht noch weiter den Zwischenprocess, falls er das Endorgan trifft oder möglicher Weise die Verhältnisse verändert, unter denen die Nervenenden sich befinden, und der Zwischenprocess veranlasst nach einer Weile eine neue Empfindung. Wirkte der angewandte Reiz momentan und war er nicht allzu stark, so dass die erste Empfindung verschwunden ist, wenn die

zweite auftritt, so erhält man also zwei Sensationen, trotzdem der Reiz nur der eine war.

Zu dieser Deutung stimmt auch die Thatsache, dass die doppelte Sensation nur von eben den empfindlichsten Punkten, also vermuthlich von den Schmerzendorganen erhalten werden kann.

Bei Anwendung einzelner Inductionsschläge hat die frühe Empfindung das niedrigste Minimum perceptibile. Erst bei starker Reizung kommt auf gewissen Punkten eine verzögerte Sensation. Wenn man von der eben gegebenen Annahme ausgeht, dass nämlich die frühe Sensation durch directe Nervenreizung, die verzögerte durch einen durch den Reiz verursachten Zwischenprocess bedingt ist, muss diese Thatsache so gedeutet werden, dass der Inductionsschlag kräftig reizend auf den Nervenfaden selbst wirkt, aber ein sehr geringes Vermögen hat, den Zwischenprocess auszulösen.

Die von Gad und Goldscheider nachgewiesene Thatsache, dass die späte Sensation deutlich bei Anwendung mehrerer Inductionsschläge in gewissem, geeignetem Rhythmus auftritt, sowie auch die Thatsache, dass sie sehr deutlich ist bei Anwendung constanter Ströme, muss consequenter Weise so gedeutet werden, dass der Zwischenprocess durch diese Reizmittel leicht ausgelöst wird.

Dass der langsam verlaufende Zwischenprocess leichter von langsam oder eine längere Zeit hindurch wirkenden Reizen ausgelöst wird, bietet ja nichts Erstaunliches angesichts der sonstigen Erfahrungen über die Entsprechung, die zwischen dem Zeitverlauf des in einem reizbaren Organ ausgelösten Processes und der Dauer des diesen Process optimal hervorrufenden Reizes besteht, und es scheint mir, dass man von diesem Gesichtspunkte aus die Resultate betrachten muss, die Gad und Goldscheider bezüglich der geeigneten Weise erhalten haben, mit Inductionsschlägen verschiedener Zahl und verschiedenem Rhythmus die spätere Sensation hervorzurufen.

Diese Erklärung sieht also in den zwei bei einer einzigen momentanen Reizung auftretenden Stichschmerzsensationen eine peripherisch bedingte Erscheinung im Gegensatze zu Gad und Goldscheider's Deutung der von ihnen studirten verwandten Erscheinung. Was mir vor Allem gegen deren Deutung zu sprechen scheint, ist der Umstand, dass gewisse Punkte auf der Haut nur die frühe Sensation auch bei Anwendung einer Serie von Inductionsschlägen auslöst.

Handelte es sich um eine Summirung im Rückenmark, so müsste die späte Sensation von allen Punkten des Nervenweges ebenso gut wie von den Nervenenden selbst aus hervorgerufen werden können, da ja durch geeignet abgepasste Reizung der von einem gewissen

Punkte des Nerven nach dem Rückenmark aufwärtsgehende Nervenprocess müsste identisch gemacht werden können mit dem von den Nervenenden (Endorganen) selbst ausgelösten.

Die einzige Einwendung, die, wie mir scheint, gegen dieses Raisonnement erhoben werden könnte, müsste von der Annahme besonderer Endorgane für die Schmerznervenenden in oben definirter Bedeutung ausgehen und weiter voraussetzen, dass der durch diese Endorgane vermittelte Nervenprocess so besonders geartet ist, dass nur er Summirung im Rückenmark bewirken kann.

Von einem solchen Standpunkte aus kann man gegen obiges Raisonnement Folgendes einwenden:

Ein Beweis ist nicht dafür erbracht worden, dass die aufwärtsgehenden Nervenprocesse, die von den unter den weniger empfindlichen Hautpunkten liegenden undifferenzirten Nervenfäden durch die in diesen Versuchen angewandten Reize ausgelöst werden, identisch mit den von den Endorganen ausgehenden Nervenprocessen sind. Es ist im Gegentheil zu vermuthen, dass die Endorgane, wenn sie gereizt werden, mit Nervenprocessen von bestimmtem Rhythmus und bestimmtem Zeitverlauf antworten, wie sie mit den auf die Nerven applicirten Inductionsströmen nicht erreicht worden sind; es ist sehr wahrscheinlich, dass die Endorgane analoge Verhältnisse mit den motorischen Zellen im Vorderhorn des Rückenmarks zeigen, die ja auf einen einzigen Reiz mit einer Serie von Nervenprocessen antworten, und dass die zu den Schmerzendorganen gehörenden Zellen im Rückenmark für den Rhythmus der von den Schmerzendorganen ausgelösten Nervenprocesse auf dieselbe Weise abgepasst sind wie die Muskeln für die zugehörigen Ganglienzellen.

Erst wenn man den Rhythmus und Zeitverlauf der von den Endorganen aufwärtsgehenden Nervenprocesse studirt und eine Methode gefunden hat, von den Nervenfäden selbst aus eine gleichartige aufwärtsgehende Reizung zu bewirken, und wenn dabei sich herausgestellt hat, dass die späte Empfindung ausbleibt, erst dann kann man sagen, es sei unmöglich, dass die späte Empfindung auf einer Summirung im Rückenmark beruht.

Einem solchen Einwurf gegenüber lässt sich indessen entgegnen, dass die Verschiedenheit zwischen den von dem Endorgan ausgelösten aufwärtsgehenden Nervenprocessen und den von Stellen der Nervenbahn durch die hier angewandten Reizmittel, die doch mechanische Reizung, Inductionsschläge von verschiedenem Rhythmus und constante elektrische Ströme umfassen, ausgelösten Nervenprocessen kaum so gross

gedacht werden kann, dass in dem einen Falle eine Summation in den Zellen im Rückenmark stattfinden sollte, in dem anderen Falle nicht.

Weiter mag bemerkt werden, dass damit, dass die Hypothese von einer Summirung im Rückenmark sich ausserdem auf die Annahme besonderer Endorgane (in oben definirtem Sinne) stützen muss, diese Hypothese ihre erklärende Bedeutung verliert, da ja diese Annahme von Endorganen mit einer bestimmten Latenzzeit schon allein auf einfache Weise das Phänomen der doppelten Schmerzsensation erklärt.

Der Vorschlag zur Deutung des Phänomens, den ich in einer früheren Arbeit gegeben — bei schwacher Reizung sollten nur oberflächliche, bei stärkerer Reizung auch tiefere Endorgane getroffen werden — war ausschliesslich gemacht worden, um das Phänomen bei thermischer Reizung zu erklären. Es ist ja klar, dass das Auftreten desselben auch bei momentaner mechanischer Oberflächenreizung — was ich damals noch nicht wusste —, wo ja verschieden tief liegende Endorgane gleichzeitig afficirt werden müssen, ein Festhalten an dieser Erklärung unmöglich macht.

Will man noch weiter an der Ansicht festhalten, dass die beiden Sensationen durch verschiedene nervöse Bildungen vermittelt werden, so muss man, anstatt den Hauptunterschied zwischen ihnen in einer verschieden tiefen Lage zu sehen, ihnen verschiedene Reizbarkeit zuschreiben, die reizbareren mit langer, die weniger empfindlichen ohne nennenswerthe Latenzzeit. Da indessen bei feiner punktförmiger Reizung die beiden Sensationen an demselben Punkte häufig auftreten, ist es wahrscheinlicher, dass dieselbe nervöse Bildung sie vermittelt.

Der Hauptinhalt unserer Erklärung ist also der, dass die freien Nervenenden besonders empfindlich für schwache thermische und mechanische Reize sind, aber mit langer Latenzzeit reagiren. Bei directer Nervenreizung fällt die Latenzzeit fort. Gleichzeitige Reizung auf diesen beiden Wegen bedingt die doppelte Schmerzsensation.

Bei dem Bericht über mechanische Reizung ist erwähnt worden, dass bei starker Reizung eines Schmerzpunktes es bisweilen geschieht, dass die bei schwacher Reizung auftretende verzögerte Sensation schwächer ist oder fortfällt und nur die augenblickliche übrig bleibt. Vielleicht kann dies in manchen Fällen darauf beruhen, dass, trotzdem die Methode darnach hinstrebte, die Nadel doch nicht alle Mal denselben Punkt, den Schmerzpunkt, traf. Wahrscheinlich hat jedoch in anderen Fällen der mechanische Insult auf irgend eine Weise den Mechanismus des Processes gestört, der die verzögerte Sensation hervorruft; dafür spricht, dass auch bei starker flächenförmiger mecha-

nischer Reizung die verzögerte Sensation schwächer werden oder fortfallen kann.

Gegen meine Deutung des Phänomens der doppelten Schmerzsensation hat Alrutz in einer vor Kurzem in schwedischer Sprache erschienenen Abhandlung (21. S. 90) verschiedene Einwendungen erhoben. Ich weiss allerdings nicht, ob sie in einer eventuellen Uebersetzung beibehalten werden würden, da sie aber zum Theil naheliegende Einwände darstellen, glaube ich doch, dass eine Erörterung derselben zu einem näheren Verständniss der Frage beitragen kann.

Alrutz stellt die Ansicht auf, dass die frühe und späte Schmerzsensation von verschiedenen Nerven ausgelöst werden, die erstere von den eigentlichen Schmerznerven, die letztere von Nerven, deren specifische Energie darin besteht, juckende Sensationen auszulösen. Die Gründe, die er für diese seine Ansicht anführt, sind folgende, der Uebersichtlichkeit wegen hier numerirt:

1. Schon der Umstand, dass er nicht die Identität der Punkte, die die frühe und die späte Sensation auslösen, constatiren konnte, macht es ihm wahrscheinlich, dass die frühe stechende und die späte juckende durch verschiedene Nerven vermittelt werden.

2. Die frühen Sensationen sind wenigstens auf gut entwickelter Haut, auch wenn sie noch so schwach sind, wirkliche Stichsensationen und sind ausserdem gut localisirt und distinct. Die schwächste späte Sensation hat dagegen einen rein juckenden, an gewissen Stellen jedoch mehr kitzelnden Charakter und wird erst bei stärkerer Reizung daneben stichartig. Sie ist diffus, irradiirend und unzweifelhaft unangenehm.

3. Die beiden Sensationen besitzen sowohl verschiedene Latenzzeit, wie auch verschiedene Reizschwellen.

4. Es erscheint wenig annehmbar, dass der thermische und der mechanische Reiz genau dieselbe Zeit brauchen sollte, um in chemischen Reiz umgesetzt zu werden. Diese Annahme wäre jedoch nothwendig, weil nach Thunberg der Unterschied der Reactionszeiten für die frühe und die späte Empfindung derselbe (0·9 Secunden) für diese beiden Reizmittel ist.

5. Es ist ferner wahrscheinlich, dass die frühe Empfindung von einem entwickelteren und differenzirteren Organ ausgelöst wird. Denn der Stich tritt schneller auf und sein Verschwinden fällt mehr mit dem Zeitpunkte zusammen, da die Wirkung des Reizes aufhört, als es bei der juckenden späten Sensation der Fall ist; sie ist ferner distincter und besser localisirt als die späte, und endlich kann das Sensations-

moment leichter von dem Gefühlsmoment unterschieden werden bei der frühen als bei der späten Sensation.

Gegen diese von Alrutz angeführten Gründe ist Folgendes zu bemerken:

1. Die hier erwähnten Thatsachen lassen sich auch unter Beibehaltung meiner Auffassung erklären. Dass gewisse Punkte nur die frühe Empfindung geben, erklärt sich ja leicht daraus, dass nur der Nerv getroffen wird; schwieriger kann es scheinen, eine Erklärung dafür zu geben, dass man auf gewissen Punkten nur die späte Sensation erhält. Ein paar Erklärungsmöglichkeiten finden sich jedoch hierfür. Vielleicht löst das eventuell differenzirte Nervenende nur die späte Empfindung aus; oder auch ist es bei punktförmiger mechanischer Reizung schwer, das unbedeutende Nervenende selbst mechanisch zu reizen, während Veränderungen um dasselbe herum, die dann die späte Sensation hervorrufen, leicht zu bewirken sind. Welche dieser Erklärungsmöglichkeiten die wahrscheinlichste ist, will ich dahingestellt sein lassen. Hält man sich indessen an die erstere, so kann die Existenz von Punkten, von denen beide Sensationen ausgelöst werden, so erklärt werden, dass unter diesen sowohl Nerv als Nervenendorgan getroffen werden; bei Annahme der anderen Möglichkeit erklärt sich das Auftreten dadurch, dass in diesem Falle des Nervenende auch direct gereizt wird.

2. Ich kann nicht die Richtigkeit der Behauptung zugeben, dass die späte Sensation vor Allem durch ihren juckenden Charakter sich auszeichnet. Es ist allerdings wahr, dass sie bisweilen juckend ist, oder vielleicht besser gesagt, dass sie sich in einer mehr oder weniger hingezogenen juckenden Sensation fortsetzt, in anderen Fällen aber ist sie völlig identisch mit der frühen. Dieser juckende Charakter der späten Sensation tritt, wie Alrutz angiebt, vor Allem bei punktförmiger mechanischer Reizung und bisweilen bei eben solcher thermischen Reizung hervor, obwohl möglicher Weise im letzteren Falle man sich besser so ausdrückt, dass die Nachsensation schwach brennend ist. In anderen Fällen aber gleicht die späte Sensation nicht mehr Jucken als die frühe es thut. Verhielte es sich nun, wie Alrutz es sich vorstellt, dass die späte Sensation von Nerven ausgelöst wird, deren specifische Energie es ist, juckende Sensationen auszulösen, so hätte man rechtmässig zu erwarten, dass die späte Sensation unter allen Umständen, wie immer sie auch hervorgerufen worden, den Charakter des Juckens besässe. Sie müsste von schwachem Jucken bei starker Reizung in starkes Jucken übergehen. Und die

vorausgesetzte Verschiedenheit der specifischen Energie müsste unter allen Verhältnissen bestehen. Das ist aber nicht der Fall. Es ist z. B. bei etwas stärkerer flächenförmiger thermischer Reizung nicht schwer zu beobachten, dass die frühe und die späte Sensation ihrem Charakter nach völlig mit einander identisch sind. Eben dieser Umstand, dass die beiden Sensationen, wenn sie am deutlichsten sind, mit einander völlig identisch sein können, ergiebt, dass ein Unterschied in der specifischen Energie bei den sie hervorrufenden Nerven nicht gedacht werden kann.

Für die bisweilen auftretende Verschiedenheit im Charakter scheint mir statt dessen eine Erklärungsmöglichkeit in der oben erwähnten Annahme zu bestehen, dass die frühe Sensation durch directe Nervenreizung, die späte durch Reizung der Endorgane (in oben verwendetem Sinne) ausgelöst wird, wenn man nämlich zu dieser Annahme die weitere hinzufügt, dass die Endorgane nicht nur einen einzigen aufwärtsgehenden Nervenprocess, sondern eine Serie solcher von bestimmtem Rhythmus und Zeitverlauf auslösen, auf die also die zugehörigen Ganglienzellen im Rückenmark, die normaler Weise von ihnen getroffen werden, eingestellt sind — eine Annahme, die mir nicht unwahrscheinlich vorkommt, wenn sie auch nicht bewiesen ist.

Bei dieser Annahme erklärt sich leicht der oft „vollere“ Charakter der späten Empfindung verglichen mit der frühen, welch letztere ja z. B. bei mechanischer Nervenreizung wohl häufig von einer einzigen solchen hervorgerufen wird.

In demselben Umstande kann man auch die Erklärung für den bisweilen auftretenden juckenden Charakter der späten Empfindung suchen. Es ist meines Erachtens wahrscheinlich, dass dieser Charakter, wenn man von seinem unbehaglichen Gefühlston absieht, eben durch den hingezogenen Verlauf der Sensation — jeder kleinste Zeitwerth der juckenden Sensation ist eine Stichsensation — ihre Irridiation und Tendenz, Reflexe auszulösen, constituirt wird. Dass Irradiation und Reflextendenz sich gerade bei der Empfindung sich zeigen, die dem rhythmischen Nervenprocesse folgt, auf den die Ganglienzellen eingestellt sind, und nicht bei der, die einem einzigen Nervenprocesse entspricht, schliesst nichts Unmögliches in sich.

Es ist nicht meine Absicht zu behaupten, dass durch die hier gemachten Annahmen alle Schwierigkeiten beseitigt seien, ich glaube im Gegentheil, dass noch Vieles übrig bleibt. Weshalb verschwindet z. B. der juckende Charakter bei vermehrter Reizung, wenn er auf Irradiation der Reizung und dadurch bewirkter Reflextendenz beruhen soll? Irridiation und Reflexe werden ja wohl bei vermehrter Reizung nicht

geringer? Ohne eingehende Untersuchungen können diese und andere hierher gehörige Fragen nicht beantwortet werden. Aber ehe die verschiedenen Erklärungsmöglichkeiten untersucht sind, hat man kein Recht, bestimmte Schlüsse betreffs der Existenz besonderer Nervenarten zu ziehen, sei es für die späten Stichsensationen und für die juckenden Empfindungen, oder allein für die letztgenannte Empfindungsqualität, auch wenn eine solche Annahme mehrerer Variablen bis auf Weiteres die Erklärung etwas erleichtern kann.

[Auch Alrutz' Beweis dafür, dass die Kitzelempfindungen durch dieselben Nerven vermittelt werden wie die späte Schmerzsensation und die juckenden Empfindungen, erscheinen mir nicht genügend. Noch scheint mir kein bestimmt entscheidender Grund gegen die Annahme vorzuliegen, dass die Kitzelempfindungen durch die Berührungs- (Druck)-Nerven ausgelöst werden; dieselben Möglichkeiten, wie sie oben für die Erklärung des besonderen Charakters der juckenden Empfindungen vorgebracht worden, scheinen mir auch für die Erklärung der Kitzelempfindungen in Betracht zu kommen.]

4. Was diesen Grund betrifft, so scheint es mir ganz natürlich, dass die späte Empfindung dieselbe Latenzzeit bei momentaner mechanischer, wie bei thermischer Reizung hat. Die Latenzzeit hängt ja von der Dauer des Zwischenprocesses ab, der in beiden Fällen identisch sein dürfte, und das Reizmittel wirkt ja nur als auslösende Ursache.

3. und 5. Die aus diesen Gründen angeführten Thatsachen vertragen sich in allen Einzelheiten mit meiner Hypothese und können also nicht als Gründe gegen dieselbe verwendet werden.

Fasse ich also meine Gründe gegen Alrutz zusammen, so finde ich vor Allem, dass er auf den Umstand, dass die frühe oder späte Sensation völlig mit einander identisch sein können, keine Rücksicht genommen, oder jedenfalls seine Bedeutung nicht genügend gewürdigt hat. Und unter solchen Verhältnissen vorauszusetzen, dass sie von Nerven mit verschiedenen specifischen Energien ausgelöst werden, erscheint mir unrichtig. Sollte man also aus anderen Gründen zu der Annahme verschiedener Nerven gezwungen werden, so können ihnen keinesfalls verschiedene specifische Sinnesenergien zugeschrieben werden. Ein hinreichender Grund aber für die eigenthümliche beinahe einzig dastehende Annahme, dass ein und dieselbe Empfindung auf derselben Hautstelle von zwei verschiedenen Arten von Nerven ausgelöst werden, scheint mir nicht vorzuliegen.

Litteratur.

1. Thunberg, Bidrag till kännedomen om hudsinnenas fysiologi. I. Ny metod för undersökning af hudens temperatursinnen och smärtsinne. *Upsala Läkareförен's förh.* 1894 bis 1895. Bd. XXX. S. 521 bis 547.

2. Goldscheider, *Gesammelte Abhandlungen.* Leipzig 1898. Bd. I.

3. Naunyn, Ueber die Auslösung von Schmerzempfindung durch Summation sich zeitlich folgender sensiblen Erregungen. *Archiv f. exper. Pathol. u. Pharmakol.* 1889. Bd. XXV.

4. Rosenbach, Ueber die unter physiol. Verhältnissen zu beobachtende Verlangsamung der Leitung von Schmerzempfindung von thermischen Reizen. *Deutsche med. Wochenschr.* 1884.

5. v. Frey, *Untersuch. über die Sinnesfunctionen d. menschlichen Haut.* Erste Abhandlung: Druckempfindung und Schmerz. Leipzig 1896.

6. Grützner, Ueber die chemische Reizung sensibler Nerven. *Pflüger's Archiv.* 1894. Bd. LVIII. S. 69 bis 105.

7. Thunberg, Bidrag till kännedomen om hudsinnenas fysiologi. II. Studie öfver adaptationsfenomen. *Upsala Läkaref förh.* Bd. XXX. 1894 bis 1895.

8. Thunberg, Unters. über d. relat. Tiefenlage d. kälte-, wärme- und schmerzpercipir. Nervenenden u. s. w. *Dies Archiv.* Bd. XI. S. 382 bis 435.

9. v. Vintschgau und Steinach, Zeitmessende Versuche über d. Temperatur- und Drucksinn. *Arch. f. d. ges. Physiol.* 1888. Bd. XLIII.

10. Tanzi, *Riv. di fren. XVI.* (cit. nach Dessoir 11 S. 317).

11. Dessoir, Ueber den Hautsinn. *Arch. f. Anat. u. Physiol.* Physiol. Abth. 1892.

12. Tigerstedt und Bergqvist, Zur Kenntniss der Apperceptionsdauer zusammengesetzter Gesichtsvorstellungen. *Zeitschr. f. Biologie.* Neue Folge. 1883. Bd. I.

13. Björnström, Algesimetrie. Eine neue einfache Methode zur Prüfung der Hautsensibilität. *Nova acta reg. soc. scient. Ups.* Festband. Upsala 1877.

14. Schlesinger, *Die Syringomyelie.* Wien und Leipzig. 1895.

15. Buch, Ein neuer Algesimeter. *St. Petersb. med. Wochenschr.* 1891.

16. Ders., Ueber Algesimetrie. Ebendas. 1892.

17. Motschutkowsky, Ein Apparat zur Prüfung der Schmerzempfind. Der Hautalgesimeter. *Neurol. Centralblatt.* 1895. 4 (cit. nach *Centralbl. für Psych. u. Nervenheilk.* 1895. S. 586).

18. *L'année psychologique.* 1896. S. 83 u. 438.

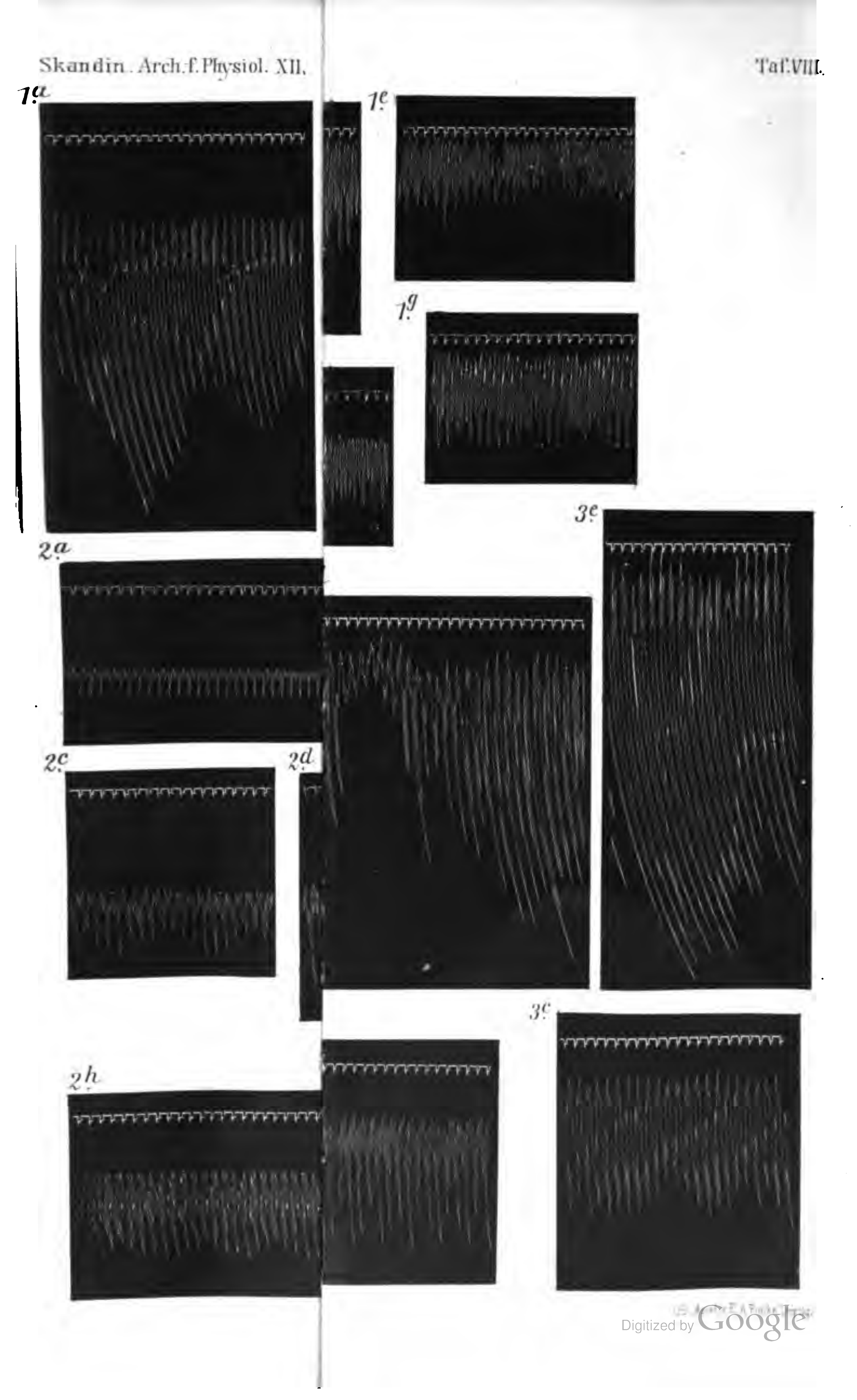
19. Blix, Experim. bidrag till lösning af frågan om hudnervernas specifika energi. *Upsala Läkareför. förhandl.* 1882 bis 1883. S. 427 bis 440.

20. Thunberg, v. Frey's metod för undersökning af hudens tryckpunkter. *Upsala Läkareför. förh.* 1895 bis 1896. Bd. I.

21. Alrutz, *Undersökningar öfver smärtsinnet.* Upsala 1901.

Berichtigungen.

S.	132	Z.	2	v. u.	statt:	derselben	lies:	desselben.
„	138	„	14	„ „	„	$\sin\psi$	„	$\cos\psi$.
„	144	„	3	„ „	„	also eine	„	also ϱ_1 eine.


1a
1e
1g
2a
2c
2d
2h
3e
3c

Skandin. A

3f



4a



4b



4c



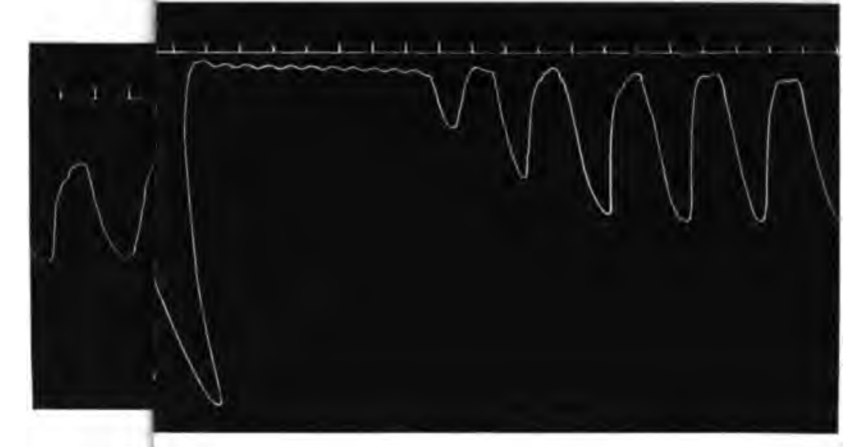


Fig. 2.

